HAL
open science

MobiSim. Appropriation et développement par ThéMA : vers une modélisation multiscalaire (fractale) du développement urbain par système multi-agents

Jean-Philippe Antoni, Gilles Vuidel, Pierre Frankhauser

To cite this version:

Jean-Philippe Antoni, Gilles Vuidel, Pierre Frankhauser. MobiSim. Appropriation et développement par ThéMA : vers une modélisation multiscalaire (fractale) du développement urbain par système multi-agents. 2009. hal-00912696

HAL Id: hal-00912696

https://hal.science/hal-00912696

Submitted on 2 Dec 2013

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.

Appropriation et développement par ThéMA

Vers une modélisation multiscalaire (fractale) du développement urbain par système multi-agents

Jean-Philippe Antoni

Gilles Vuidel

Pierre Frankhauser

Avec la participation de

Yann Fléty et Caroline Molherat

Avril 2009

Préambule

Le présent rapport MobiSim clôture la convention 07 MT S 032 établie entre le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire, et le laboratoire de géographie théorique et quantitative ThéMA, ainsi que la subvention qui lui a été associée. L'objet de cette convention n'était pas de proposer des développements spécifiques pour la plateforme de simulation MobiSim, mais essentiellement de réaliser le transfert du programme de ATN[1] vers ThéMA[2], suite à la cessation d'activité de l'entreprise ATN en 2008. Cette appropriation par une nouvelle équipe de développement (cf. l'équipe ThéMA présentée dans le point 5.1), a nécessité une expertise logicielle importante, assistée et conseillée par P. Casanova de ATN. Sur la base des codes sources fournis, elle a donné lieu à une réécriture quasiment intégrale du programme, dont l'intérêt est justifié dans les pages suivantes. Cette réécriture propose dorénavant une nouvelle base théorique et informatique pour MobiSim, qui permet d'envisager concrètement et rapidement l'implémentation de modules complémentaires au sein du programme.

De ce fait, le présent rapport ne peut être dissocié de l'historique du programme MobiSim et des choix et propositions de modélisations effectuées par ATN. Ces derniers peuvent être consultés dans l'un des derniers rapports de recherche produits par ATN dans le cadre du PREDIT, dont une version numérique est téléchargeable à l'adresse suivante :

http://www.mobisim.org/doc/MobiSim-Rapport-ATN.pdf

---

[1] ATN (Application des techniques nouvelles est l'entreprise, dirigée par Philippe Casanova, qui a initié les recherches sur la plateforme MobiSim et qui en a assuré le développement de 2000 à 2007.

[2] Le laboratoire ThéMA (Théoriser et Modéliser pour Aménager) est une unité mixte de recherche (UMR 6049) qui associe le CNRS, les universités de Franche-Comté et de Bourgogne. Au sein du laboratoire, l'objectif général poursuivi par l'équipe "Mobilités, ville et transports", qui développe désormais la plateforme MobiSim, est de participer à une meilleure connaissance de la structure et de la dynamique spatiale des villes et des territoires environnants, dans lesquels elles s'insèrent et avec lesquels elles fonctionnent.

Introduction

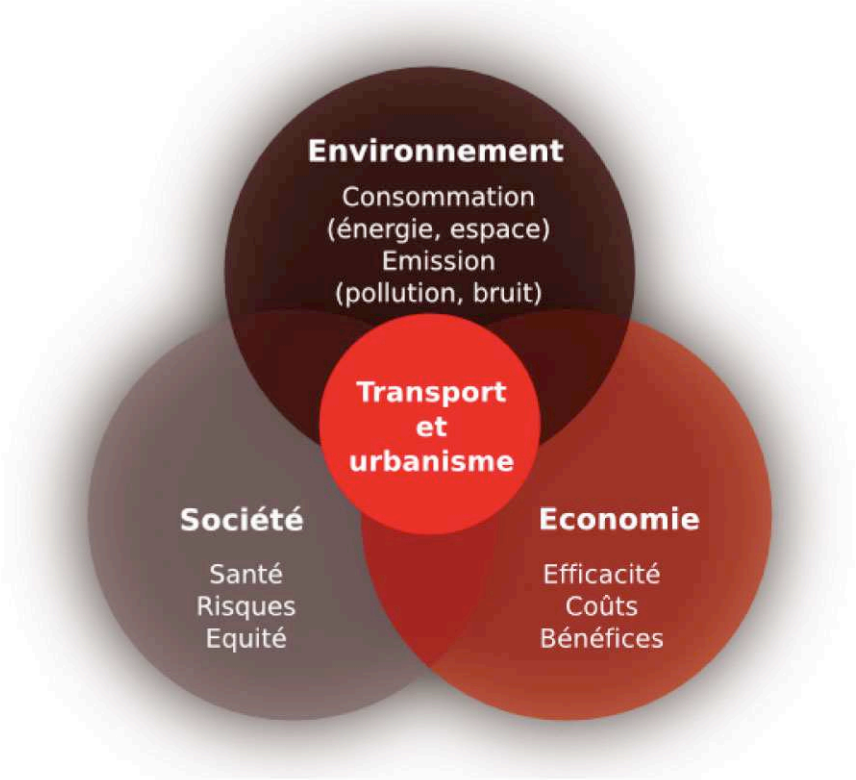
En introduction, nous rappelons brièvement ce qu'est MobiSim, en repositionnant ses objectifs et ses ambitions. Le projet MobiSim (simulation des mobilités) consiste à développer une plateforme de simulation pour l'étude prospective des mobilités quotidiennes et résidentielles dans les agglomérations françaises et européennes, et leur lien avec le développement, l'étalement et l'aménagement urbains. Cette plateforme se base sur plusieurs modèles, notamment un Système multi-agents, couplé à un Automate cellulaire. Les différents champs de développements identifiés aujourd'hui concernent les problématiques 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, etc.

Au regard de ces objectifs, le projet peut paraître ambitieux. L'approche individus-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. Elle permet toutefois de 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, MobiSim 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.

Sur le plan des résultats escomptés et actuellement en cours de développement, MobiSim doit 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.

Figure 0.1
Des indicateurs sur les trois sphères du développement durable



J.P. Antoni, d'après ATN, Février 2009

Sur la base des travaux du projet Propolis[3], ces évaluations prennent alors la forme d'indicateurs relativement simples. 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

[3] Propolis (Planning and Research of Policies for Land Use and Transport for Increasing Urban Sustainability) est un projet de recherche européen, financé par la Commission européenne dans le cadre du 5e PCRD, qui vise à tester des solutions intégrées liant la problématique des transports à celle de l'occupation du sol et de l'urbanisation. Il fournit un certain nombre d'outils et de méthodologies développées dans ce cadre. Cf. http://www1.wspgroup.fi/lt/propolis/

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.

Le présent rapport s'organise en cinq parties. La première traite de l'appropriation de MobiSim en tant que telle, et distingue les critiques logicielles et les critiques conceptuelles que l'on peut formuler au sujet du programme. Ces critiques nous amènent à proposer une refonte théorique du programme que nous présentons dans la partie 2, en montrant comment une approche multiscalaire (fractale) peut y être intégrée, comment cette intégration nécessite de formaliser une ontologie spécifique à MobiSim, et comment cette ontologie mobilise finalement deux familles de modèles (les Systèmes multi-agents et les Automates cellulaires), dont les développements peuvent s'organiser en modules ; nous abordons ensuite la question des données dans MobiSim (un point qui, tel qu'il était jusqu'à présent traité, posait un certain nombre de questions), et proposons de clarifier leur « rôle » en les organisant en quatre sphères. Dans la troisième partie, nous présentons ensuite les développements en cours : le projet de typologie des mobilités (appuyé sur l'expérience du Pays graylois qui pose la question des transports à la demande), et le projet d'Etiquettes énergétiques (commandé par l'Ademe). Enfin, la dernière partie regroupe un certain nombre d'informations techniques sur les membres du groupe de travail MobiSim, sur le comité de pilotage qui a été mis en place, sur les réunions et les communications effectuées, sur le site Internet mis en ligne pour soutenir le projet, etc.

1. Appropriation de MobiSim

La phase d'appropriation de MobiSim a consisté à utiliser le programme au sein de ThéMA afin d'en comprendre le fonctionnement avec précision, de manière à pouvoir émettre un avis critique sur la modélisation effectuée, et de proposer des développements complémentaires permettant d'améliorer ou de faire évoluer le logiciel. Cette étape a été réalisée en deux temps :

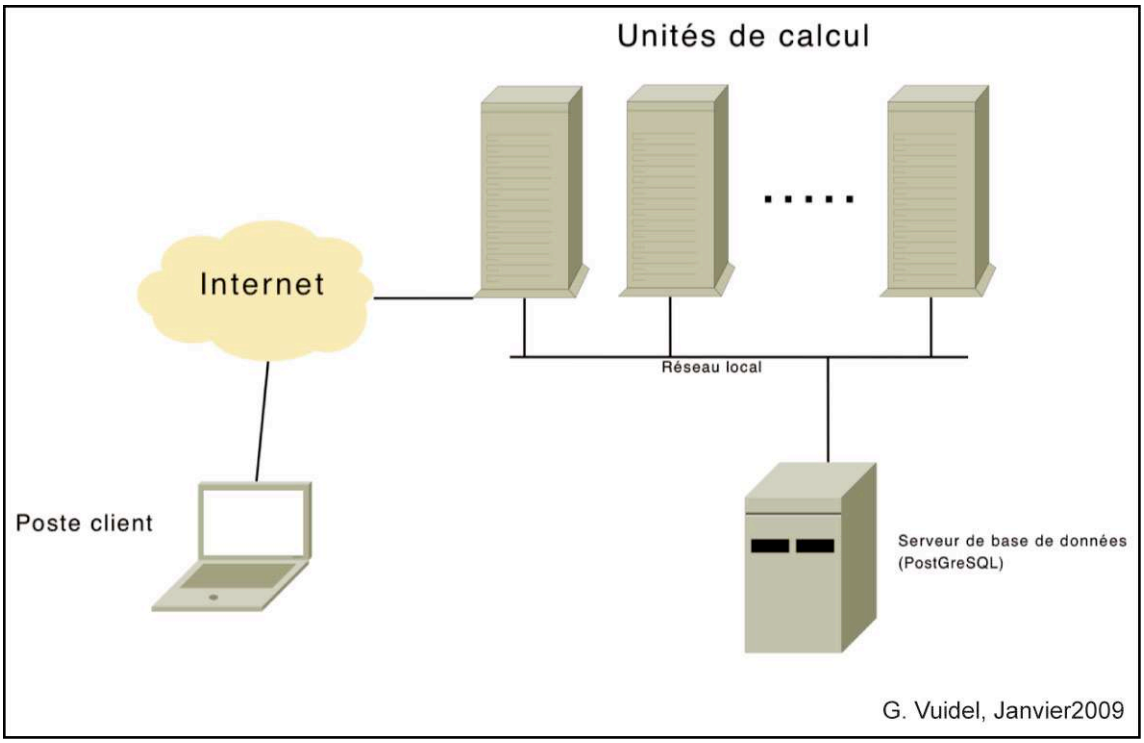
- installation et utilisation de MobiSim sur les machines de ThéMA à partir des jeux de données fournis par ATN (sur l'agglomération rennaise essentiellement). Cette opération a permis de développer un point de vue modélisateur/utilisateur ;
- analyse du code informatique écrit par les informaticiens de ATN, afin de comprendre précisément l'ensemble des algorithmes utilisés pour faire « tourner » le programme, ainsi que la manière avec laquelle ces algorithmes ont été formalisés et implémentés en Java. Cette opération, essentiellement réalisée par Gilles Vuidel, a permis de développer un point de vue modélisateur/développeur.

Le résultat de cette phase d'appropriation est ici livré en deux parties : une expertise du logiciel et du code source qui met l'accent sur des modifications souhaitables ; une expertise du modèle conceptuel de MobiSim qui pointe une étape inachevée vers le développement d'une version individus-centrée du programme (type Système multi-agents) pour laquelle une modification conceptuelle sera proposée dans la partie suivante.

1.1. Expertise du logiciel (code source)

L'un des principaux écueils de le dernière version de MobiSim, identifié dans le rapport « MobiSim SMA – Plateforme de simulation pour l'étude prospective de la mobilité urbaine des agglomérations françaises et européennes » livré par ATN en juillet 2005, se situe dans les temps de calcul importants qui sont nécessaires pour exécuter les simulations. **L'expertise du logiciel montre que la masse de données à manipuler et de calcul à réaliser pour chaque itération du programme conduit effectivement à des lourdeurs incompressibles en termes de volume de calculs. Néanmoins, il semble qu'une optimisation soit rendue possible par la mise en place de calculs en parallèle.** Le parallélisme permet en effet de distribuer les calculs à effectuer sur plusieurs processeurs, éventuellement sur plusieurs ordinateurs, et donc de réduire les temps d'exécution d'autant. Ainsi, alors que la structure du programme est aujourd'hui dessinée pour fonctionner sur un ordinateur unique, la Figure 1.1.1 présente une nouvelle organisation qui semble plus cohérente.

Figure 1.1.1
Structure du programme et calculs en parallèle

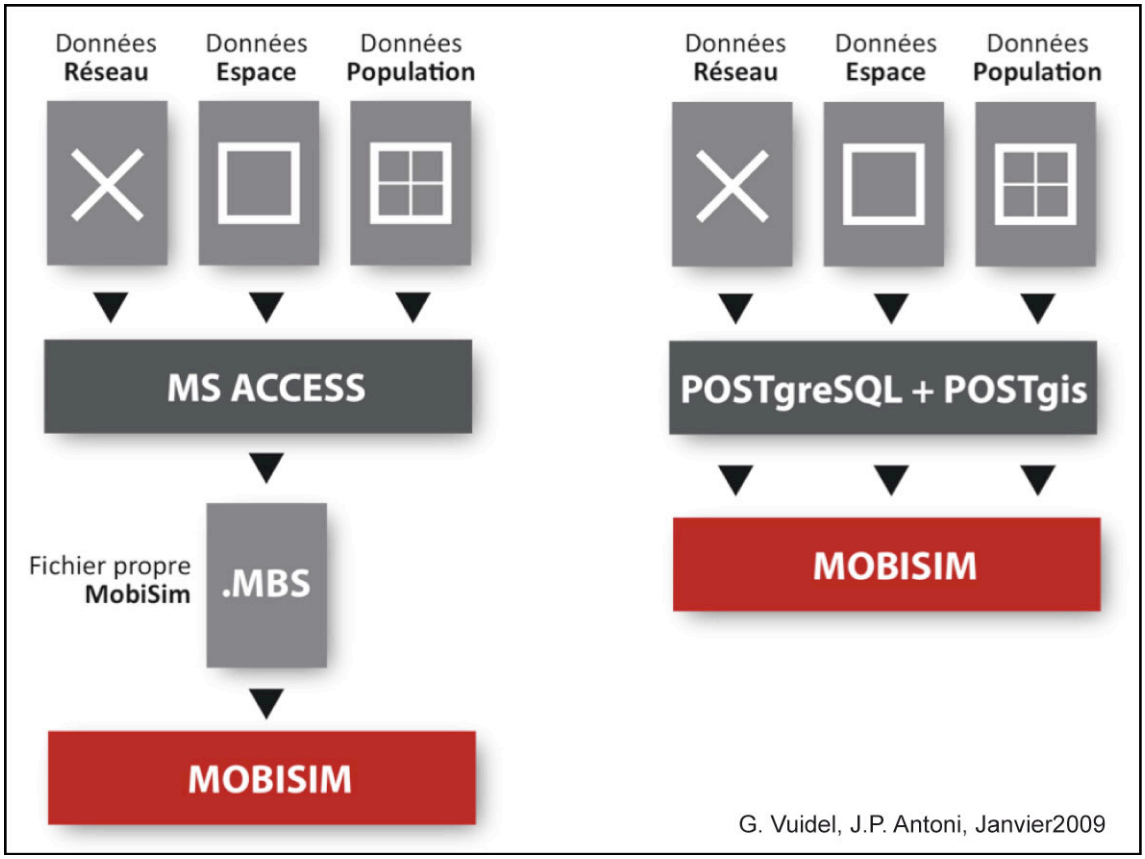


L'idée consiste ainsi à relier entre elles plusieurs unités de calcul, par l'intermédiaire d'un réseau local (type Ethernet ou fibre optique). Par le même moyen, ces unités sont également reliées au serveur de bases de données, qui, comme son nom l'indique gère le stockage et l'accès aux données. La solution retenue pour cette gestion est actuellement PostgreSQL, à laquelle s'ajoute PostGIS pour les données spatiales. Grâce à cette configuration, le poste client qui permet aux utilisateurs de gérer les simulations (création, paramétrage, lancement, et visualisation des résultats) peut physiquement se situer n'importe où : il suffit pour ce faire qu'il soit connecté à Internet et qu'une liaison sécurisée avec le « centre de calcul » soit créée. Précisons que ce schéma est un schéma théorique, qui doit servir de base à la programmation de MobiSim, de manière à ce que la structure du logiciel soit capable de gérer une telle configuration. Cette dernière semble optimale compte tenu de la masse de calculs et de données à gérer dans le programme. Cette proposition n'oblige pas à ce qu'une telle configuration soit effectivement mise en place : le logiciel fonctionne également sur un poste informatique unique et sans connexion Internet.

Parallèlement, dans la version ATN, les fonctions du programme gérant la masse importante de données ont été confiées à un programme extérieur. Ce programme est un SGBDR

propriétaire : MS Access, développé par Microsoft. Il propose une solution standard à la gestion des données, qui n'est en aucun cas optimisée pour la problématique traitée par MobiSim. De surcroît, en tant que SGBDR standard, MS Access ne gère pas les données géométriques et spatiales. Il a donc du être complété par un second logiciel propriétaire, lié à MobiSim par une liaison du même type que la précédente : le SIG MapInfo, développé par la société américaine Pitney Bowes. Or, à l'inverse de MS Access (qui est couramment distribué puisqu'il est intégré dans le Pack Office de Microsoft), MapInfo n'est pas un logiciel commun : c'est un produit spécifique au traitement des données géographiques, qui nécessite l'acquisition d'une licence relativement onéreuse, et qui demande à ce que ces utilisateurs aient suivi une formation pour son utilisation. **L'utilisation combinée d'Access et de MapInfo pour faire fonctionner MobiSim pose une série de questions quant à l'autonomie du logiciel MobiSim, en même temps qu'elle en complexifie l'usage, qui s'appuie nécessairement sur une acquisition contraignante et termes de coûts et de formation.**

Figure 1.1.2
Une nouvelle architecture logicielle pour MobiSim



Des solutions « libres » existent pour pallier le double problème que posent le recours à MS Access et MapInfo : PostGreSQL (avec l'extension PostGIS pour la gestion des données géographiques) permet en effet d'internaliser les fonctions utiles à MobiSim. Intégrées dans le programme, celles-ci ne nécessitent plus ni l'acquisition des licences, ni de formation spécifique (l'utilisateur peut se référer au seul mode d'emploi MobiSim pour gérer la question des données, géométriques ou non). Cette intégration est présentée dans la figure 1.1.2 , qui montre la première structure MobiSim (à gauche) et présente la nouvelle, compte tenu du précédent argumentaire (à droite) :

L'ensemble de ces modifications n'est évidemment pas anodin, et remet considérablement en cause le code du programme écrit et transmis par ATN. Sa modification paraît complexe à réaliser, ce d'autant plus qu'il est parfois mal documenté et peu commenté, inconvénient qui ne permet pas toujours d'en relever les subtilités, ni d'y trouver aisément ce que l'on y cherche. **Dans ce contexte, il a paru plus rapide, plus logique et plus aisé de réécrire l'intégralité du code, en s'appuyant toutefois largement, par endroits, sur les travaux réalisés jusqu'alors.** Le langage reste par contre Java, le même que précédemment, qui permet l'utilisation de MobiSim sur les trois plateformes Windows, Mac OS et Linux.

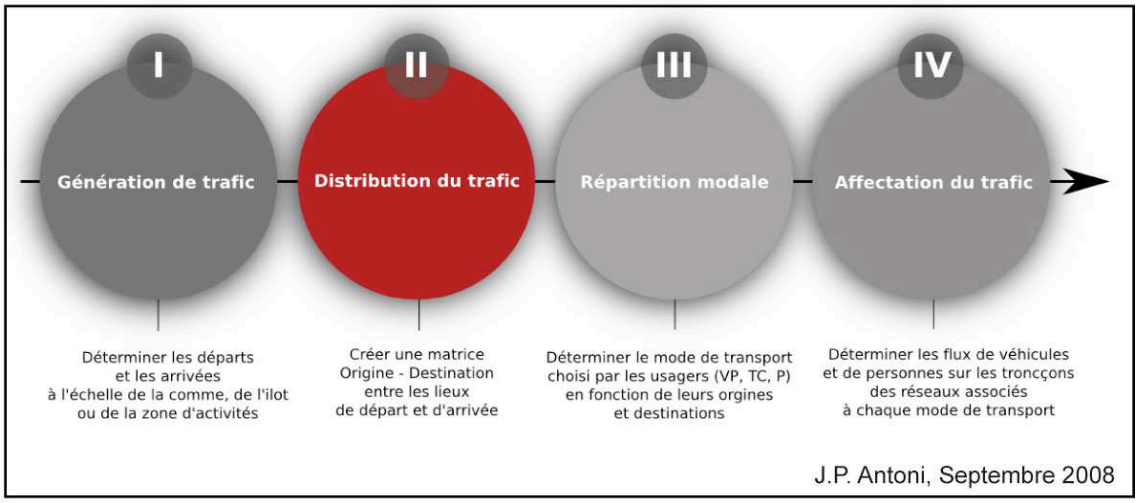
1.2. Expertise du modèle conceptuel

Dans la dernière version transmise par ATN, deux types de modèles sont essentiellement utilisés pour faire fonctionner MobiSim : un modèle de trafic et un modèle de simulation des évolutions démographiques. Le premier est un modèle dit à quatre étapes (M4E), classique dans les modélisations liées au transport et au trafic. Le second est issu du modèle Destinie développé par l'INSEE pour simuler la structure d'une population à plus ou moins long terme. Il n'y a pas, selon nous, d'incohérence fondamentale entre ces deux modèles qui peuvent être combinés avec une bonne cohérence fonctionnelle. Cela étant, ils n'envisagent pas la question des populations, de leurs choix et de leurs déplacements à la même échelle : le premier fonctionne à un niveau agrégé pour lequel les individus sont considérés au sein de groupes (leur comportement dépends alors du groupe, en non d'eux-mêmes), alors que le second fonctionne à un niveau désagrégé et prend en compte tous les individus du système simulé, en les distinguant par leur sexe, leur âge, leur PCS, etc. Cette différence pose un problème théorique : celui de l'individu au sein de MobiSim et de la manière avec laquelle il est pris en compte. Si l'on se réfère à la volonté qu'a pu avoir ATN de rapprocher MobiSim d'un Système multi-agents, c'est indéniablement l'approche centrée sur les individus (façon Destinie) qui doit être privilégiée.

Ce premier constat conduit également à formuler la remarque que **MobiSim SMA n'est pas véritablement un SMA, et ne peut pas immédiatement le devenir si l'on considère sa structure conceptuelle**. En effet, si l'utilisation successive et complémentaire de modèles

n'entrave pas le fonctionnement actuel du programme, répétons-le, l'intégration d'une « intelligence » distribuée aux individus (i.e. aux agents), qui permettrait véritablement d'associer MobiSim à un SMA, semble quant à elle plutôt incompatible. La succession des étapes du M4E illustre bien ce problème, et témoigne de l'incompatibilité entre une logique agrégée et une logique « agents » dans laquelle chaque individu est capable de faire des choix et de prendre des décisions compte tenu de caractéristiques qui lui sont propres. Ceci peut être montré pour chacune des quatre étapes :

Figure 1.2.1
Le modèle à quatre étapes



- **Etape 1 « Génération de trafic ».** La génération de trafic consiste à déterminer le nombre de personnes qui quitte la zone dans laquelle ils habitent pour travailler dans une autre zone. On calcule donc ici le nombre de « partants » de chaque zone et le nombre d' « arrivants » dans chaque zone, à partir d'une fonction faisant intervenir le nombre d'actifs, d'élèves et d'étudiants de chaque commune (éventuellement aussi leur PCS) d'une zone, et le nombre d'emploi et la capacité d'accueil des écoles et des universités d'une autre zone. Nous sommes ici dans une logique agrégée ;
- **Etape 2 « Distribution du trafic ».** La distribution du trafic consiste à relier les zones deux à deux entre celles dont les individus partent et celles dans lesquelles ils arrivent. De manière très classique, ce calcul est effectué par l'intermédiaire d'un modèle gravitaire qui prend globalement en compte le nombre de départs de chaque zone, son nombre d'arrivées et la distance qui les sépare. Ici, les lieux de destination ne prennent donc pas en compte les individus et leurs caractéristiques : ils sont déterminés par la configuration de l'espace géographique dans la zone d'étude, indépendamment d'un choix éventuel lié aux acteurs. A cette étape, la modélisation

requiert un modèle gravitaire qui présuppose une logique agrégée, mais qui peut être améliorée par démarche individus-centrée de type « programme d'activité » ;

- **Etape 3 « Choix modal ».** L'étape du choix modal consiste à savoir si les individus se déplaceront en VP ou en TC sur le parcours déterminé à l'étape 2. Ce calcul, qui se révèle complexe sur le plan théorique comme sur le plan pratique (c'est certainement l'étape la plus délicate du M4E, dans l'état actuel de nos connaissances) n'est globalement pas implémentée dans MobiSim. On considère, pour faire simple, que tout le monde se déplace en VP. Il est délicat d'envisager cette étape à un niveau agrégé ;
- **Etape 4 « Affectation du trafic ».** Cette étape consiste à déterminer les flux routiers, c'est-à-dire à affecter le trafic sur le réseau de routes connaissant le nombre de personnes se déplaçant d'un lieu à un autre (étape 1 et 2) et leur mode de déplacement (étape 3). L'affectation se fait par tranches, ce qui permet de tenir compte de la congestion : certains usagers voyant que la circulation est dense sur certains tronçons, prennent un autre itinéraire. La logique se situe ici à un niveau intermédiaire entre une démarche agrégée et une démarche individus-centrée.

La succession de ces quatre étapes montre que **le programme « oscille » plus ou moins systématiquement entre une démarche agrégée et une démarche plus centrée sur les individus. Cette « oscillation » ne permet pas de saisir avec précision la place qu'occupent les agents dans MobiSim, situation qui bloque les développements futurs, du moins sur un plan conceptuel.** En effet, quel type de modèle faut-il continuer à développer dans MobiSim et quel(s) type(s) de données faut-il collecter pour l'alimenter : des chiffres agrégés issus d'enquêtes ménages par exemple indiquant le comportement des individus visualisés à travers des groupes ? Ou bien des informations plus fines indiquant la manière avec laquelle les individus construisent leur raisonnement et prennent leurs décisions dans l'espace ? Il paraît bien sûr évident que ces deux jeux d'informations, qui se situent à un niveau différent, ont tous les deux leur importance pour le calibrage de MobiSim : on veut ici passer de l'individu au groupe ; mais comment agréger les populations pour que, à partir du niveau individuel, se forment des groupes (sociaux, de voisinage, d'intérêt, etc.) et que l'ensemble de ces groupes corresponde à la population totale de l'aire géographique étudiée ? Mais les relations entre les deux demandent à être clarifiées, ce qui, avec la nécessité identifiée au point 1.1. de réécrire le code en grande partie, justifie une refonte théorique du programme MobiSim. Cette refonte théorique fait l'objet de la partie 2.

2. Une refonte théorique

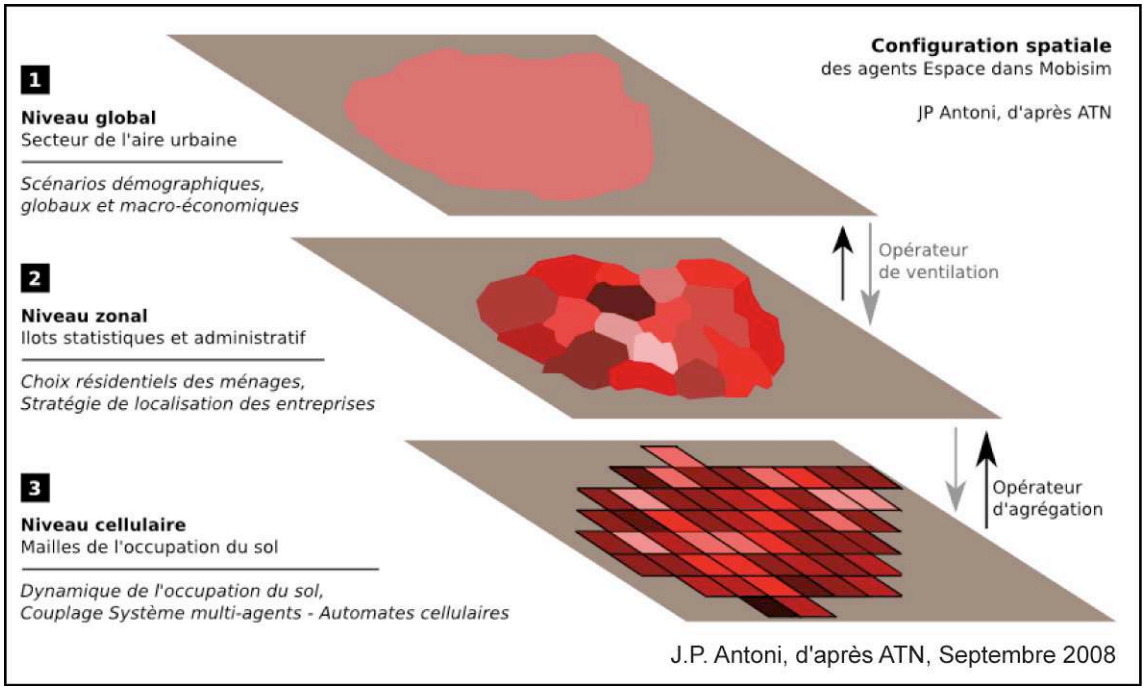
La refonte théorique que nous proposons ici ne remet pas fondamentalement en cause les principes sur lesquels se fondaient les précédents développements de MobiSim. Elle vise simplement à mettre en cohérence ces développements avec les approches renouvelées que nous proposons désormais :

- dans un premier point, nous approfondissons la lecture à plusieurs échelles de l'espace géographique qui avait été initiée dans le dernier rapport produit par ATN, en montrant l'intérêt d'une prise en compte en trois niveaux au minimum, intégrant notamment un niveau cellulaire permettant de mieux prendre en compte l'occupation du sol et la problématique de l'étalement urbain ;
- dans un deuxième point, nous généralisons ce principe multiscalaire pour proposer une formalisation théorique de l'espace géographique et des agents qui y interagissent, qui prend la forme d'une véritable ontologie pour MobiSim, orientée autant vers une utilisation et un développement interdisciplinaire et multiscalaire (fractal) du programme que vers son implémentation informatique ;
- dans un troisième point, nous voyons comment cette ontologie permet de focaliser sur deux familles de modèles, les Systèmes multi-agents et les Automates cellulaires, qu'il s'agit de combiner pour l'ensemble des développements à effectuer : les premiers sont intéressants pour l'approche individus-centrée des agents qu'ils proposent, alors que les second apportent un intérêt pour une prise en compte cellulaire et possiblement multiscalaire de l'espace géographique ;
- dans un quatrième point, nous proposons un schéma qui organise l'ensemble des points précédents en différents modules permettant de modéliser les données, les processus et les impacts à prendre en compte dans la modélisation MobiSim, et de les visualiser graphiquement ou cartographiquement. Ce Grand schéma (cf. annexes) apparaît véritablement comme un outil de travail pour structurer, organiser et planifier les développements, mais également pour communiquer autour de MobiSim ;
- enfin, dans la dernière partie, nous faisons le point sur la question des données à associer à chaque module, en les organisant en quatre « sphères » qui interviennent à différents niveaux dans les simulations et la production de scénarios.

2.1. Un principe multiscalaire

La prise en compte de l'échelle spatiale de MobiSim pose une série de questions, d'ores et déjà évoquées dans le rapport « MobiSim SMA – Plateforme de simulation pour l'étude prospective de la mobilité urbaine des agglomérations françaises et européennes » de ATN (cf. Préambule) : il s'agissait de représenter le territoire à différents niveaux, chacun permettant d' « isoler » une entrée spécifique du programme et d'y simuler des processus particuliers. Toutefois, si cette idée était présentée de manière pertinente et cohérente par ATN, elle n'était pas encore implémentée dans le programme au moment où le code nous a été fourni. Il importe donc ici d'en reprendre et d'en compléter le principe, avant d'en proposer une formalisation mathématique et une implémentation informatique complètes.

Figure 2.1.1
Les trois niveaux de prise en compte de l'espace géographique dans MobiSim



Si le principe qui vise à considérer l'espace d'une aire urbaine selon différentes échelles peut paraître trivial, sa mise en œuvre concrète 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 autre espace discret, voire 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 à un autre processus**: le niveau global, le niveau zonal et le niveau cellulaire.

a. Le niveau global

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 existants (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'extérieure 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).

b. Le niveau zonal

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.

c. Le niveau cellulaire

Le niveau dit cellulaire (celui des cellules géographiques) 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 localisent à proximité d'un parc ou d'un jardin 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).

Ces 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), et opérateurs d'agrégation (sommant, par exemple, l'offre immobilière de chaque cellule pour quantifier l'offre à l'échelle de la zone). Ces opérateurs participent d'une formalisation générale de l'espace géographique que nous développons dans le point 2.2.

2.2. Vers une ontologie renouvelée et originale

Le problème de l'approche agrégée / individuelle, soulevé dans le point 1.2, et la question de l'approche multiscalaire développée dans le point 2.1 apparaissent, d'un certain point de vue, comme une seule et même question, qui se pose sur deux types d'objets différents. D'une part en effet, **il s'agit de passer de l'individu au groupe d'individus puis à la population totale (et inversement), et d'autre part, de la cellule à l'îlot ou au quartier, puis à l'aire urbaine complète (et inversement). Sur ces deux types d'objets que constituent les « individus » et les « espaces », il convient dès lors d'opérer un certain nombre d'agrégations et de ventilations permettant de passer d'une échelle à l'autre. Le développement plus spécifique d'une ontologie permet ici de préciser et de formaliser les modalités de ces changements d'échelle,** et ainsi de développer la base d'une formalisation multiscalaire de l'espace et des individus propre à MobiSim, mais largement généralisable à d'autres types de modélisations. Cette formalisation, qui s'associe à une ontologie, doit être développée dans un cadre

interdisciplinaire et assurer une forte cohérence conceptuelle entre les aspects thématiques de la problématique traitée (ici la mobilité et l'urbanisation) et les aspects techniques liées aux possibilités de simulation informatique.

a. Cadre théorique de l'ontologie spatiale

La thématique de l'urbanisation et des mobilités urbaines pose en effet un certain nombre de questions fondamentales, liées à la manière avec laquelle les habitants d'une ville voient et considèrent leur environnement, comment ils raisonnent spatialement dans cet environnement, comment ils s'y déplacent et y habitent, etc. Une réponse complète et sérieuse à ce sujet repose nécessairement sur une approche interdisciplinaire, liant les domaines explorés par les géographes, les urbanistes, les économistes, les psychologues (notamment la psychologie environnementale), les sciences de l'information, etc.[4]. A cela s'ajoutent encore les statistiques et les mathématiques qui permettent une approche plus formelle et ouvrent le champ à la modélisation, ainsi que les sciences de l'information géographique (SIG, analyse spatiale, géostatistiques, etc.) qui proposent une approche plus fondamentale sur ces questions. Cette interdisciplinarité pourrait conduire à des simulations prospectives basées sur une modélisation des comportements des agents qui reposerait alors sur les acquis, le vocabulaire et les méthodes plus ou moins spécifiques de différentes disciplines. Une telle situation introduit possiblement des incompréhensions entre les acteurs, les utilisateurs et les modélisateurs au sein du projet MobiSim, incompréhensions qui peuvent être dépassées par la prise en compte de deux points complémentaires :

1. Les acteurs doivent s'accorder sur le manière avec laquelle l'espace géographique est pris en compte, décrit et organisé dans les simulations envisagées, de manière à ce que les options spatiales liées aux simulations puissent être clairement exprimées ;
2. La complémentarité et la compatibilité de chaque simulation spatiale, malgré le fait qu'elle fasse intervenir des champs disciplinaires différents, doit être assurée par une logique propre à leur formalisation, ce qui permet d'éviter les paradoxes et aide à la compréhension de chacun (Franck, 1997).

Ces deux nécessités impliquent une définition précise de l'environnement de la modélisation, qu'il concerne l'espace ou les individus, c'est-à-dire une ontologie. Cette démarche ontologique n'est pas sans lien avec le champ de la modélisation

[4] Projet ECDESUP (l'évaluation, le choix et la décision dans l'usage des espaces urbains et périurbains) : une approche interdisciplinaire des mobilités quotidiennes et résidentielles ; cf. www.ecdesup.org.

d'accompagnement et des démarches collaboratives de partage d'information et de savoir ; ces dernières ont fait l'objet de nombreuses publications qui intéressent assez directement le projet MobiSim. L'émergence forte de ce type de démarche soulève en effet deux problèmes préliminaires, 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 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, trouve *in fine* une complémentarité autour de questions concrètes.**

Selon Gruber (1992), une ontologie apparaît en effet comme une « spécification et une conceptualisation explicite ». Gaurino (1998) ajoute qu'elle doit s'associer à une théorie et à une logique faisant intervenir un vocabulaire formel capable de décrire cette conceptualisation du monde. Dans notre cas, nous pouvons donc considérer que l'ontologie doit conduire à la définition de chaque objet prenant place au sein du système spatial modélisé, intégrant les attributs de ces objets et les relations qu'ils entretiennent entre eux. De ce fait, et comme le notent Fonseca et al. (2000), une ontologie spatiale, et plus spécifiquement encore une ontologie urbaine, doit intégrer :

- des objets (des individus, des quartiers, des commerces, des écoles, etc.) ;
- des relations (un employé possède un lieu de travail, un bâtiment appartient à un quartier, etc.) ;
- des évènements (un réseau de transport congestionné, la création d'une nouvelle zone d'activité, etc.) ;
- des processus (un flux routier, des nuisances induites par le transport, etc.).

Cela étant, il est important de préciser ici qu'il existe une différence entre l'ontologie dans le sens où le terme est employé d'un point de vue philosophique et conceptuel, et le sens où l'entendent les informaticiens. Pour les développeurs, l'ontologie correspond en effet à une sorte d'artefact relevant du domaine de l'ingénierie, permettant de décrire une certaine réalité avec un vocabulaire spécifique. Pour les philosophes, elle se caractérise par un système particulier de catégories (une « taxologie ») reflétant une vision particulière du monde. C'est sur la base de cette différence que Smith (1998) distingue les R-Ontologies (reality-based ontologies) des E-Ontology (epistemology-based ontologies) : la première relève du domaine des sciences de l'information et de l'ingénierie informatique, alors que la seconde nécessite une conception plus philosophique de la manière avec laquelle les choses s'organisent dans le monde. **Dans**

le cadre de MobiSim, il apparaît nécessaire de combiner ces deux approches puisqu'elles se complètent en formant les deux volets d'un même problème : la manière avec laquelle les choses s'organisent sur un plan conceptuel, et avec lesquelles elles peuvent être implémentées informatiquement. Dans ce contexte, l'ontologie de MobiSim ne peut pas être développée indépendamment du cadre théorique des SIG et de l'intelligence artificielle, notamment des Systèmes multi-agents et des Automates cellulaires. Au sein des SIG, il est désormais commun de considérer une hiérarchie en trois niveaux pour les concepts de modélisation spatiale, selon une distinction comparable à celle qui sépare la connaissance des données en intelligence artificielle :

- des concepts spatiaux associés à une théorie (ou une conception propre au modélisateur) sur ce qu'est l'espace géographique ;
- des modèles spatiaux associé à une définition formelle (ou mathématique) de ces concepts spatiaux ;
- une structure spatiale permettant d'implémenter et de coder ces modèles dans un langage informatique.

Toutefois, de nombreux auteurs notent que malgré cette dimension théorique, et malgré plusieurs années de recherche dans ce domaine, **aucun concept unique n'a encore été mis au point pour décrire l'espace géographique sans controverse : il n'existe pas de formalisation permettant d'intégrer toutes les questions concernant la manière avec laquelle les habitants d'une ville voient et considèrent leur environnement, comment ils raisonnent spatialement dans cet environnement, comment ils s'y déplacent et y habitent, etc.** Une ontologie unique ne permet pas de « capturer » tous les aspects de la réalité ; plusieurs ontologies doivent au contraire être mises au point sur cette base pour répondre à des problématiques plus spécifiques. Dans ce contexte, **nous proposons de construire une ontologie propre à MobiSim, relevant d'une conception spécifique de l'espace géographique, basée sur des choix justifiés par la thématique des mobilités et du transport**, mais qui peuvent mener à des incompatibilités possibles avec d'autres manière de concevoir le monde et l'espace. L'objectif relève alors d'un double enjeu : définir un cadre ontologique qui soit le plus proche possible des objectifs de MobiSim, et qui conduise à un minimum d'incompatibilités et de contradictions *a priori*.

b. formalisation pratique de l'ontologie spatiale

Pour formaliser l'ensemble des entités à prendre en compte au sein du système spatial étudié, commençons par définir les plus petits éléments de chacun des deux groupes

pris en compte, à savoir la cellule pour le groupe « espace » et l' individu pour le groupe « agents » :

1 Entités

Soit E l'ensemble des entités e_i
On définit 2 sous-ensembles de E :
- A pour l'ensemble des agents a_i : $A \subset E$
- S pour l'ensemble des cellules s_i : $S \subset E$

Les caractéristiques de chacune de ces entités sont définies de la même manière par deux jeux d'informations stockés dans deux vecteurs. Le premier vecteur est dynamique et comprend des informations qui peuvent changer dans le temps (comme la PCS d'un individu ou l'occupation du sol d'une cellule), alors que le deuxième vecteur est statique et comprend des informations invariables (comme le sexe d'un individu ou une servitude légale appliquée sur une parcelle ou une cellule). Chaque entité est alors entièrement définie par la concaténation des deux vecteurs, et peut être formalisée ainsi :

2 Attributs

- les attributs dynamiques définis par le vecteur dW_i^t
- les attributs statiques définis par le vecteur sW_i

soit $dW_{i,k}^t$ l'attribut dynamique k de l'entité e_i au temps t
soit $sW_{i,l}$ l'attribut statique l de l'entité e_i
on définit l'entité comme la concaténation des 2 vecteurs e_i^t : $dW_i^t \| sW_i$

A partir de cette base, nous définissons un certain nombre d'opérateurs permettant de grouper les individus. Ces groupements permettent également de changer d'échelle : pour les agents, on passe de l'individu au groupe, puis à la population totale ; pour l'espace, on passe de la cellule au quartier, puis à l'aire urbaine en entier. Evidemment, chacun de ces changements d'échelle conserve l'ensemble des informations présentes dans les vecteurs statique et dynamique et les répercute au niveau supérieur. Plusieurs fonctions d'agrégation peuvent alors coexister pour effectuer cette opération. Le choix de l'une d'entre elles dépend de la problématique traitée et des implications thématiques liées à ce choix. A titre d'exemple, on peut ici donner quelques exemples de fonctions d'agrégation, parmi les plus simples :

3 Agrégation

On définit l'ensemble des entités D_i^s de l'échelle s contenues par l'entité e_i^{s-1}. *Pour l'espace D est définissable facilement par contre pour les agents il n'y a encore rien de clair...* Les attributs d'une entité peuvent être définies comme l'aggrégation Φ des attributs des entités correspondantes à l'échelle supérieure.

$$e_{i,k}^s = \Phi^k \left(D_i^{s+1}\right) \tag{1}$$

3.1 Exemples d'opérateur d'agrégation

Moyenne arithmétique

$$\Phi_{mean}^k (D) = \frac{1}{|D|} \sum_m d_{m,k}, d_m \in D \tag{2}$$

Moyenne arithmétique pondérée

$$\Phi_{mean}^{k,p} (D) = \frac{1}{\sum_m d_{m,p}} \sum_m d_{m,k}\, d_{m,p}\,,\ d_m \in D \tag{3}$$

Maximum

$$\Phi_{max}^k (D) = max\{d_{m,k} | d_m \in D\} \tag{4}$$

Etc...

Dans le sens inverse, des opérateurs de désagrégation peuvent aussi être mis au point, selon un principe identique : ils permettent de passer de l'aire urbaine à la cellule, ou de la population totale à l'individu. A titre d'exemple, on peut faire les propositions suivantes :

4 Désagrégation

Les attributs des entités peuvent être définis comme la désaggrégation Ψ des attributs de l'entité correspondante à l'échelle inférieure.

$$D_{i,k}^{s+1} = \Psi^k \left(e_{i,k}^s, D_{i,L}^{s+1}\right), avec\, L : K - \{k\} \tag{5}$$

4.1 Exemples d'opérateur de désagrégation

Ventilation égale de l'attribut k

$$\Psi_{equal}^k (e, D) = \frac{e_k}{|D|} \tag{6}$$

Ventilation de l'attribut k pondérée par l'attribut p avec $p \neq k$

$$\Psi_{weight}^{k,p} (e, D) = \{\frac{1}{\sum_n d_{n,p}}\, e_k\, d_{m,p} \,|\, d_m \in D\} \tag{7}$$

Notons ici que le nombre d'agrégations est fini : on ne peut agréger les entités au delà de la population totale et de l'aire urbaine complète. Dans le sens de la désagrégation, par contre, les itérations ne sont finies que pour les entités « agents » : à partir de la population totale, on ne peut plus constituer de groupe à une échelle inférieure à celle de l'individu. De même, pour les agents « espace », la succession des échelles suit une progression géométrique (ce qui n'est pas le cas des « individus ») : les échelles du niveau inférieur doivent nécessairement s'emboîter dans celles du niveau supérieur. Ainsi, les possibilités de changement d'échelle « espace » sont nécessairement fonction de la plus grande échelle (niveau le plus important). A partir de ce niveau, il n'y a par contre pas de limite à la désagrégation, du moins en théorie : on peut décomposer l'espace jusqu'à une infinité de cellules plus petites (ce qui n'est pas le cas des « agents » pour lesquels les individus constituent une limite inférieure).

c. Un exemple : les logements.

Pour mieux visualiser ce que signifie ce principe d'agrégation sur le plan thématique, et pour témoigner de son implémentation complète au sein du programme MobiSim, nous l'illustrons par un exemple concret portant sur le nombre de logements de la Communauté d'agglomération du Grand Besançon (CAGB). A partir des fichiers BD Topo de l'IGN, importés dans PostGreSQL (cf. 1.1), nous effectuons les opérations suivantes :

- **Définition de la grille.** La grille est définie à partir de l'étendue rectangulaire enveloppant la zone d'étude (CAGB) et des différentes résolutions choisies (25m, 50m, 200m, 1000m, 4000m). Ces résolutions sont pour l'instant proposées à titre de test ;
- **Création de la couche occupation du sol.** L'occupation du sol est générée à partir des couches de la BD Topo de l'IGN suivantes : « batiment », « zone_arboree », « surface_eau », « surface_activite ». Avant de faire la décomposition proprement dite un prétraitement est effectué pour définir le plus finement possible la typologie des bâtiments. En effet la typologie fournie par la couche « bâtiment » de l'IGN est très incomplète. Pour l'améliorer, nous proposons de croiser la couche « surface_activite » avec la couche « bâtiment ». Concrètement cela revient à créer une table « bati_activ » qui affecte une nouvelle catégorie à un « bâtiment » quand celui-ci intersecte une surface d'activité avec plus de 50% de sa surface. Ci-dessous la requête SQL correspondante :

```
CREATE TABLE mobisim.bati_activ AS SELECT bati.gid,activ.categorie as activité

FROM batiment_region as bati LEFT JOIN surface_activite_region as activ
        ON (ST_intersects(activ.the_geom, bati.the_geom)
```

```
AND area(ST_intersection(bati.the_geom,
ST_buffer(activ.the_geom, 0))) / area(bati.the_geom) > 0.5 );
```

Suite à cette opération, il devient possible de créer une vue intermédiaire qui agrège les différents champs contenant une information sur le type de bâti :

- nature de la couche « bâtiment » ;
- catégorie de la couche « bâtiment » ;
- catégorie de la couche « surface_activite » renommée en « activité » dans la table « bati_activ ».

L'agrégation se fait de manière hiérarchique, du plus précis vers le moins précis : « si la valeur du champ « Nature » est différente de « Autre » on prend « Nature » sinon si catégorie est différent de Autre on prend catégorie sinon si activite est différent de NULL on prends activite sinon on met Autre ».

Ce qui donne en SQL :

```
CREATE VIEW mobisim.bati_categorie_tmp AS SELECT bati.gid, bati.the_geom, hauteur,
        CASE    WHEN not(nature like 'Autre') THEN nature
                WHEN not(catégorie like 'Autre') THEN catégorie
                WHEN not(activite is NULL) THEN activite
                ELSE 'Autre'
        END AS categorie

FROM bdtopo25.batiment_region as bati, mobisim.bati_activ as activ
WHERE bati.gid = activ.gid;
```

Enfin on crée la vue « bati_categorie » qui simplifie les différentes catégories comme suit :

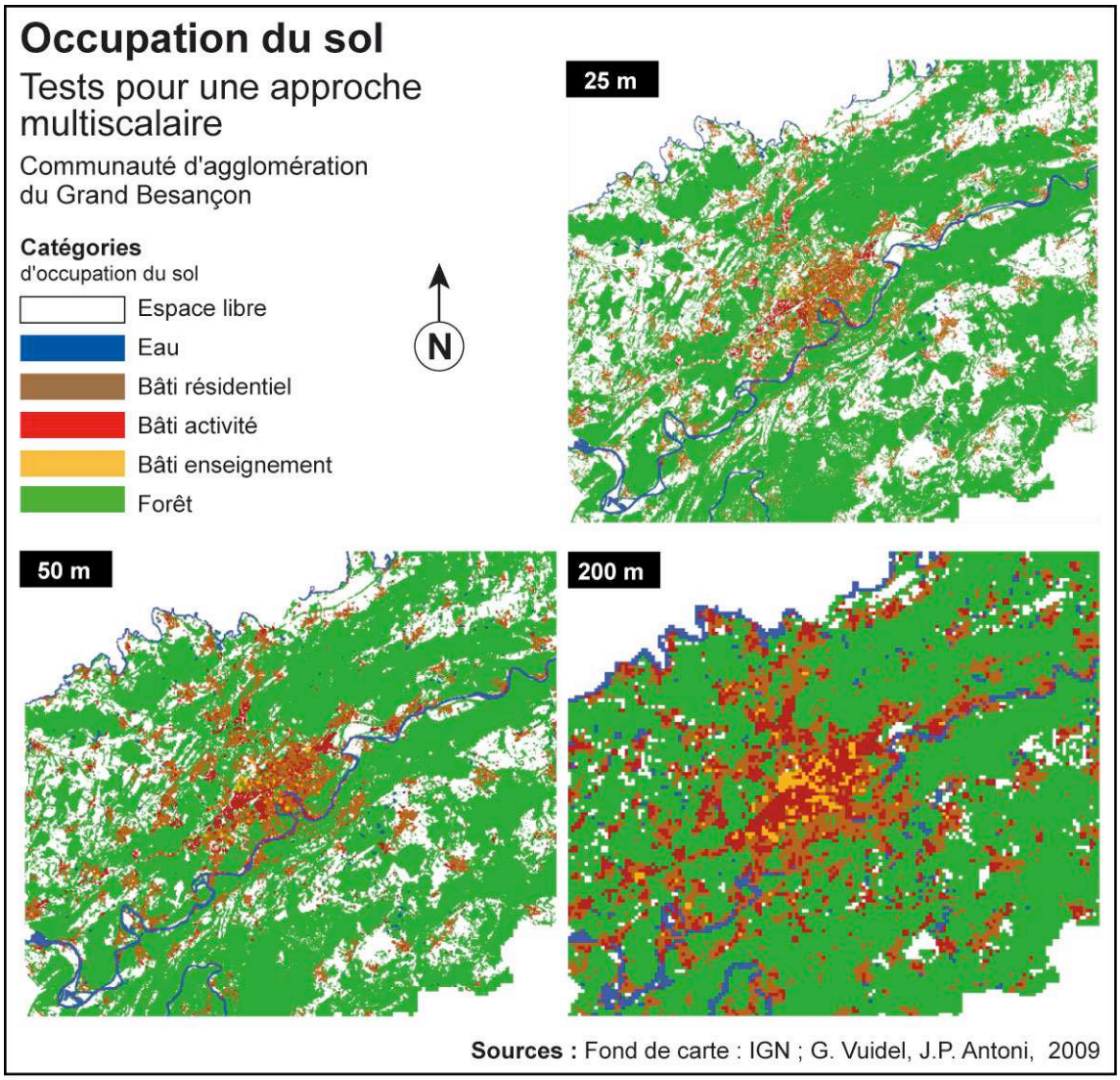
"Autre"	→	1 Logement
"Administratif"	→	2 Activité
"Bâtiment agricole"	→	0
"Bâtiment commercial"	→	2 Activité
"Bâtiment industriel"	→	2 Activité
"Bâtiment religieux divers"	→	0
"Bâtiment sportif"	→	0
"Chapelle"	→	0

“Château”	→	0
“Culture et loisirs”	→	0
“Eglise”	→	0
“Enseignement”	→	3 Ecole
“Fort, blockhaus, casemate”	→	0
“Gare”	→	0
“Gestion des eaux”	→	0
“Industriel, agricole ou commercial”	→	2 Activité
“Industriel ou commercial”	→	2 Activité
“Mairie”	→	2 Activité
“Péage”	→	0
“Préfecture”	→	2 Activité
“Santé”	→	2 Activité
“Serre”	→	0
“Silo”	→	0
“Sport”	→	0
“Tour, donjon, moulin”	→	0
“Transport”	→	0
“Tribune”	→	0

Ce qui donne en SQL :

```
CREATE VIEW mobisim.bati_categorie AS SELECT gid, the_geom, hauteur, categorie,
        CASE categorie WHEN 'Autre' THEN 1
        WHEN 'Administratif' THEN 2
        WHEN 'Bâtiment commercial' THEN 2
        WHEN 'Bâtiment industriel' THEN 2
        WHEN 'Enseignement' THEN 3
        WHEN 'Industriel, agricole ou commercial' THEN 2
        WHEN 'Industriel ou commercial' THEN 2
        WHEN 'Mairie' THEN 2
        WHEN 'Préfecture' THEN 2
        WHEN 'Santé' THEN 2
         ELSE 0
      END AS type
FROM mobisim.bati_categorie_tmp;
```

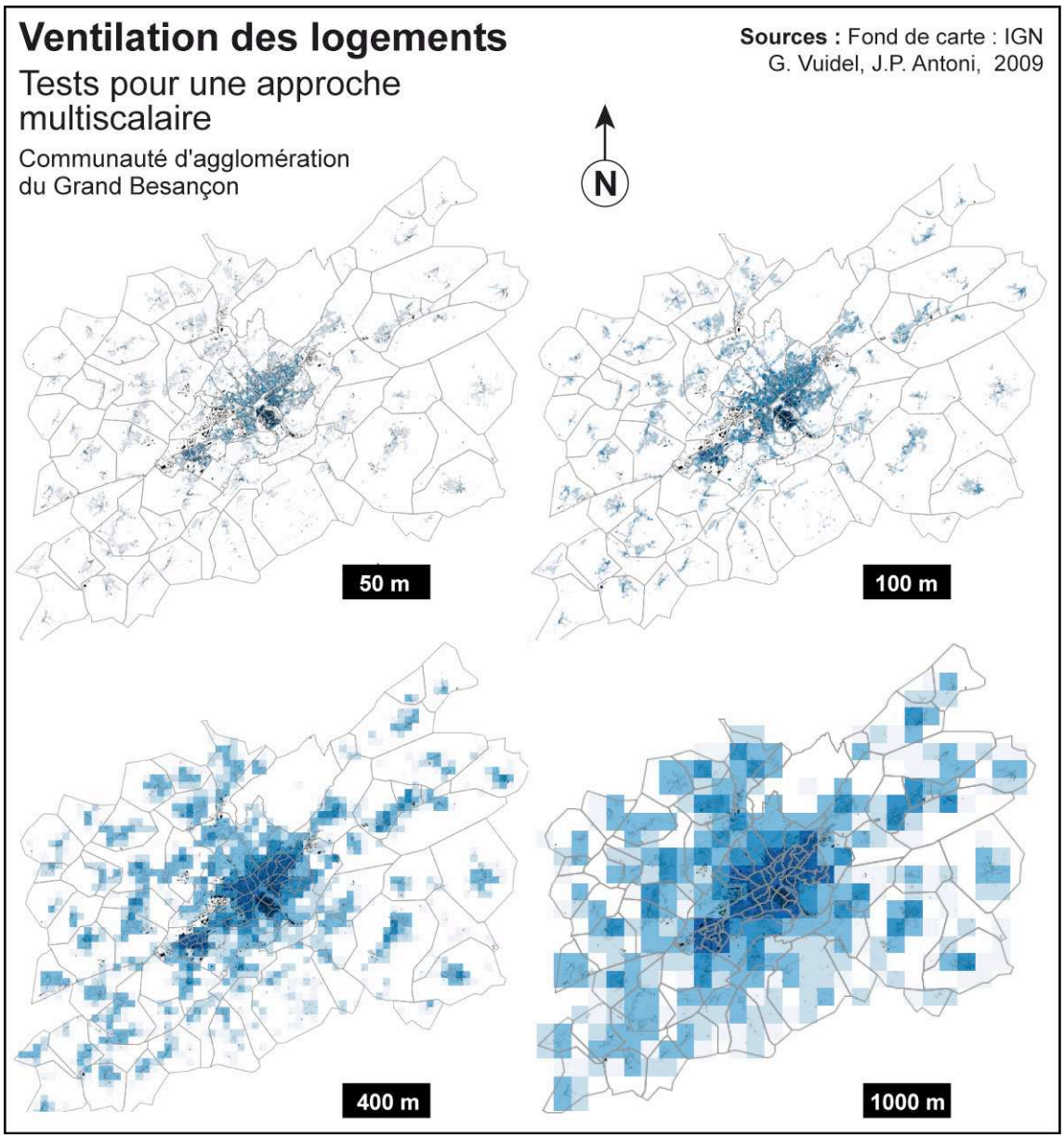
Figure 2.2.1.
L'occupation du sol de la CAGB (tests pour une approche multiscalaire)



- Corrections manuelles. Après ces prétraitements la typologie est dans l'ensemble plutôt bonne : les grandes zones industrielles et commerciales sont bien affectées. Il reste toutefois un problème dans le centre ville où une bonne partie des bâtiments administratifs reste indéterminée. Pour y remédier, une correction manuelle a été effectuée en modifiant la nature des bâtiments suivants : la mairie, les centres des impôts, la faculté des lettres, le musée et le

cinéma des beaux arts, la citadelle. Il reste néanmoins certains bâtiments mal affectés en centre ville car un polygone bâti correspond parfois à un ensemble de bâtiments de différentes natures (une erreur due aux données sources, qui semble plus ou moins incompressible).

Figure 2.2.2.
Ventilation des logements au sein de la CAGB



- Création de la couche « Occupation du sol ». On peut maintenant créer la couche occupation du sol comme suit, dans chaque cellule à chaque échelle :

si on a du bati enseignement ⇒ 5 bati enseignement

sinon si on a du bati activité ⇒ 4 bati activité

sinon si on a du bati logement ⇒ 3 bati résidentiel

sinon si on a de l'eau ⇒ 2 eau

sinon si on a de la forêt ⇒ 1 forêt

sinon ⇒ 0 espace vide

Le résultat peut être représenté cartographiquement par l'occupation du sol sur la grille définie précédemment à différentes résolutions : 25m, 50m, 200m (Figure 2.2.1). Cette première étape étant réalisée, il est possible de ventiler les logements de la CAGB, dont le nombre est connu au niveau des IRIS ou des communes. Cette ventilation se fait en plusieurs étapes :

- Dans un premier temps, on détermine à quelle commune ou IRIS appartient chaque bâtiment résidentiel de la couche « bâtiment » de la BD Topo IGN :

$$p_{ij} = \begin{array}{l} 1\, si\, Z_i \cap B_j = max_k\{Z_k \cap B_j\} \\ 0\, sinon \end{array}$$

- On détermine ensuite le volume total de bâtiments résidentiels dans chaque commune ou IRIS (ce qui nécessite de tenir compte de la hauteur des bâtiments) :

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

- A partir du volume dans chaque zone, il est possible de calculer la densité de logements de chaque bâtiment :

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

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

- Enfin, on calcule le nombre de logements dans chaque cellule :

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

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

Le résultat peut être représenté cartographiquement par le nombre de logements dans chaque cellule, à différentes résolutions : 1000m, 100m, 50m (Figure 2.2.2).

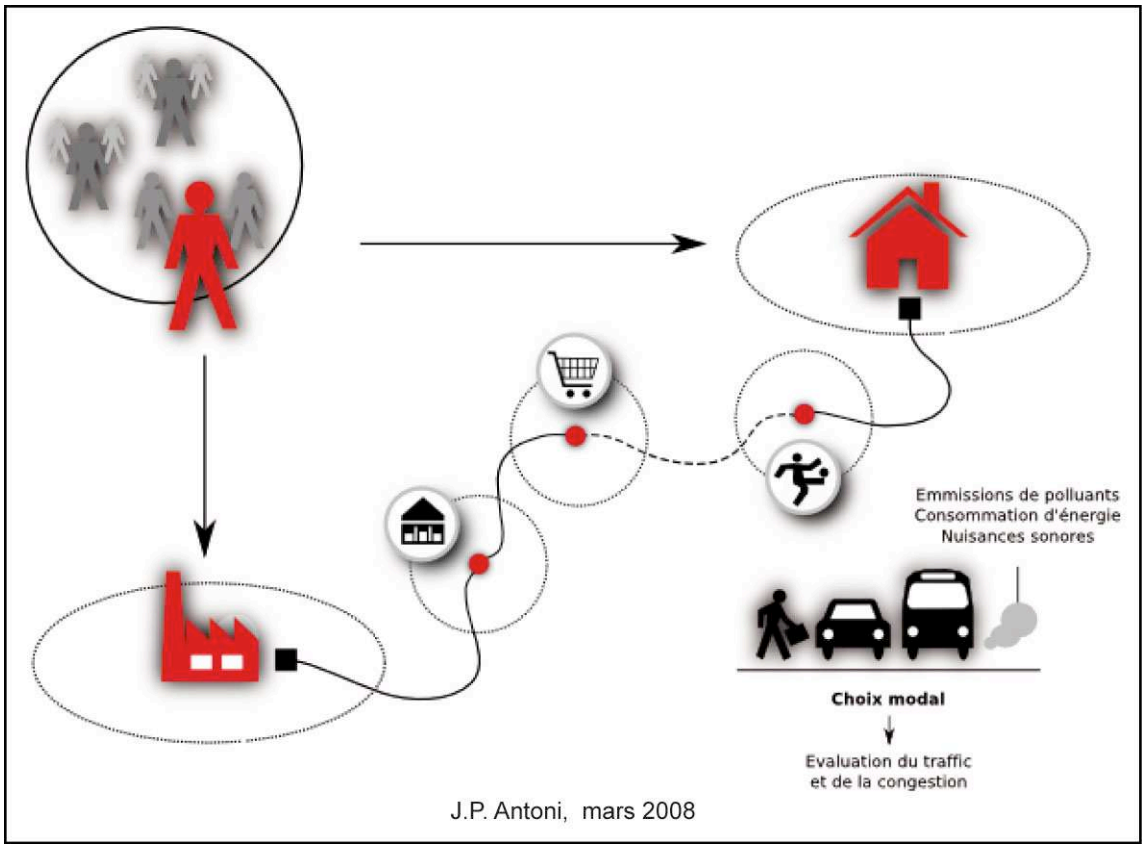
En conclusion, nous avons ici formalisé un nouveau cadre théorique pour la prise en compte de l'espace géographique et des « agents » au sein de MobiSim. Ce cadre formel est actuellement complètement implémenté dans le programme, et fait l'objet d'un code spécifique associé au module D2 (cf. partie suivante). A partir de cette base, des développements plus innovants sont aujourd'hui en cours de réalisation, à travers la notion d'émergence notamment, qui devrait permettre de développer un « générateur d'émergence ».

2.3. Un couplage de deux familles 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 deux types de modèles, associés à des objectifs de simulation

relevant de problématiques différentes. Ici, deux 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 : les Systèmes multi-agents et les Automates cellulaires. Ils répondent aux deux modèles précédemment implémentés par ATN dans MobiSim (modèle individus-centré type Destinie et modèle agrégé type quatre étapes ; cf. 1.2).

Figure 2.3.1.
Principe des Systèmes multi-agents appliqué à la problématique MobiSim



a. 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**

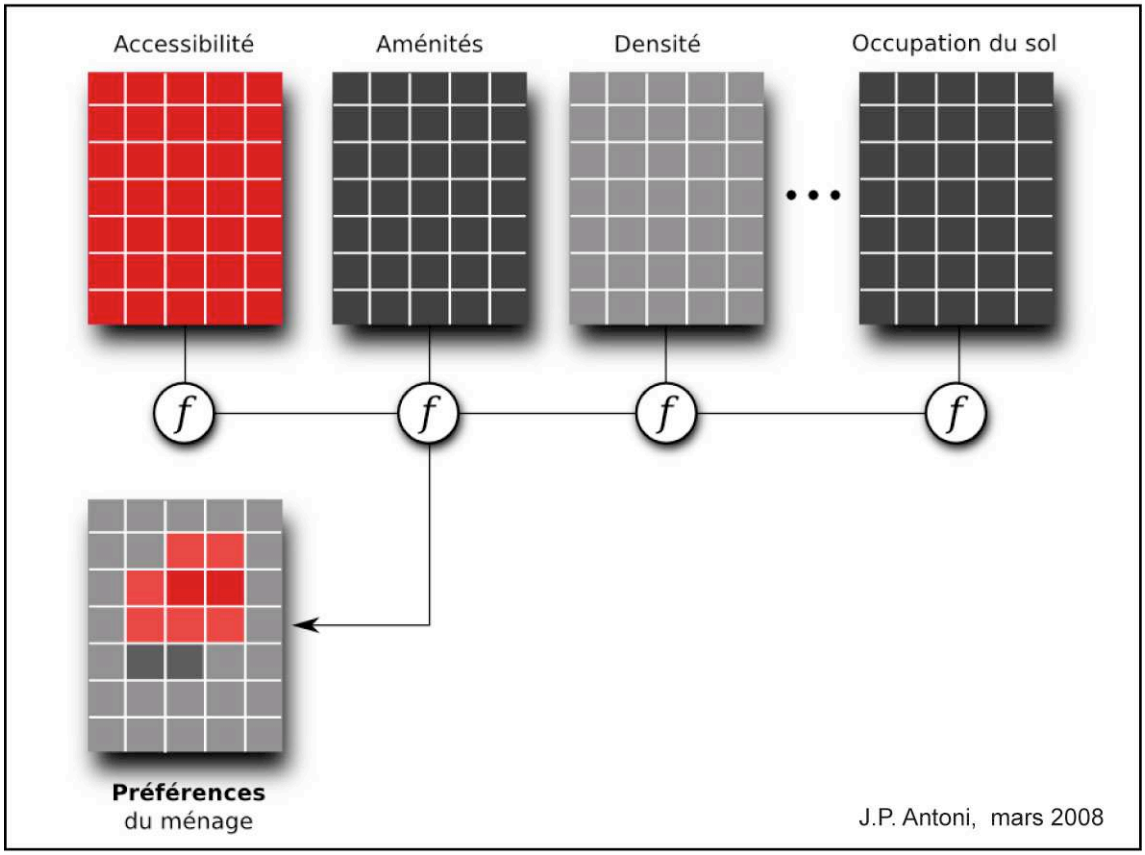
adaptés pour tenir compte de la dynamique de ces différents acteurs au cœur des processus liés à la mobilité et à l'aménagement urbains (Pumain et al., 1995). En urbanisme et en aménagement du territoire, ce type de modèle se révèle en effet particulièrement bien adapté à la modélisation comportementale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

Les SMA constituent une avancée importante dans l'univers de la complexité 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.

Figure 2.3.2.
Principe des Automates cellulaires appliqué à la problématique MobiSim



b. Mobilités résidentielles et dynamique d'occupation du sol : les automates cellulaires

Ensuite, 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 étapes précédentes. Si l'on se réfère aux trois niveaux définis précédemment dans la partie 2.1 (cf. Figure 2.1.1), la dynamique de l'occupation du sol doit être 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).

Sur le plan des résultats escomptés et actuellement en cours de développement, l'imbrication de ces deux modèles à différentes échelles devrait rapidement permettre (et permet déjà en partie) d'évaluer les conséquences liées 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[5]. 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 niveau 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.

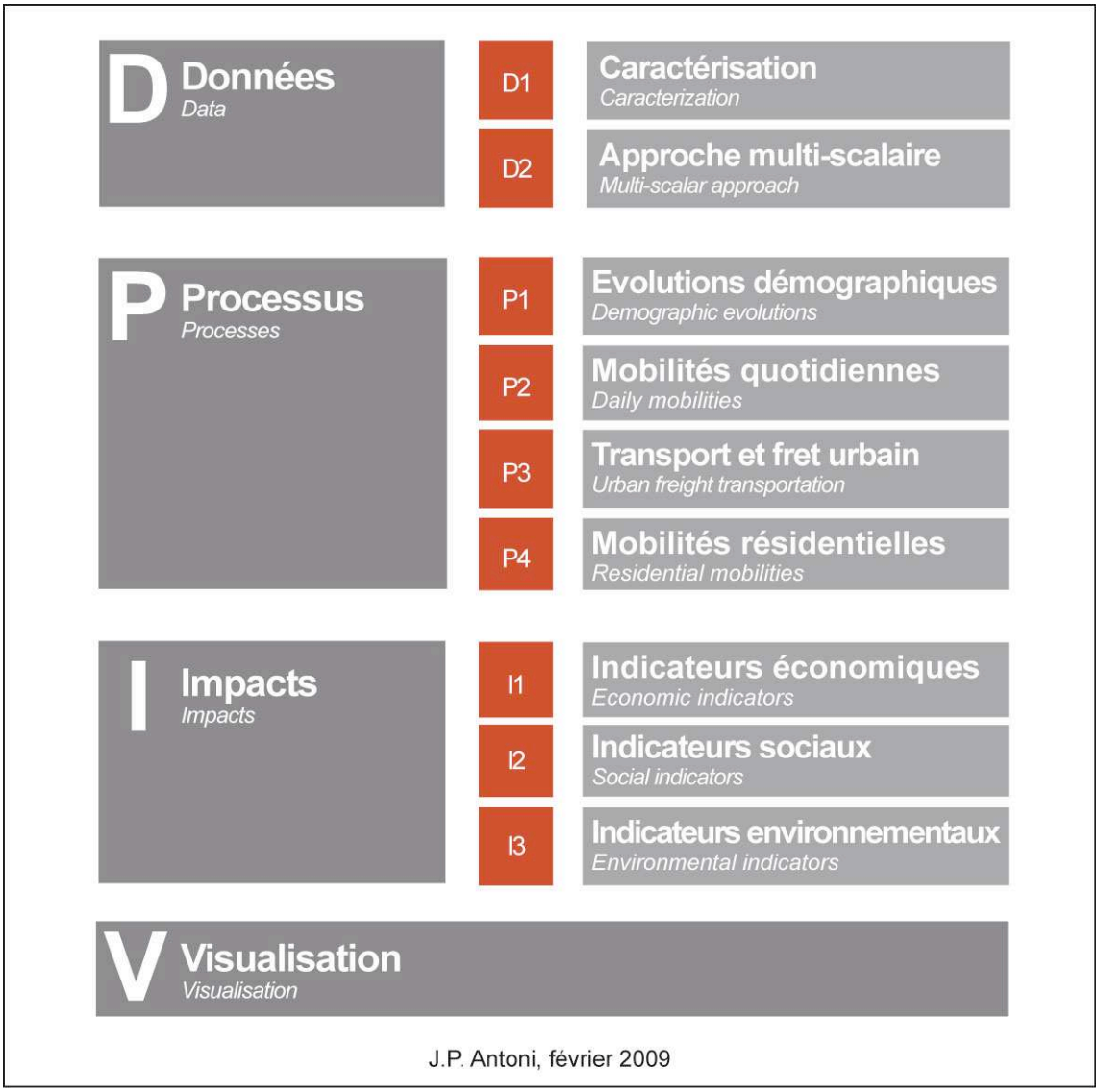
2.4. Une organisation en modules

De manière à clarifier le fonctionnement de MobiSim et l'imbrication des deux modèles décrits plus haut, associés à la définition ontologique des entités « agents » et « espace », il est apparu nécessaire d'organiser le programme en le structurant en modules. Chacun de ces modules effectue alors une tâche unique, et répond en quelque sorte à une problématique qui

[5] 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.

lui est spécifique. La complexité de MobiSim vient alors du fait que tous les modules sont combinés les uns aux autres et que les résultats des uns apparaissent comme les données d'entrée des autres. L'ensemble se construit de manière hiérarchique à partir de trois modules de base, décomposés en sous-modules (S-Modules) associés chacun à un type de modélisation spécifique :

Figure 2.4.1.
Le Grand Schéma MobiSim (version simplifiée) - Une version complète figure en annexe



- **Module D : modélisation des données.** A partir de l'ontologie MobiSim, ce module permet de créer une base de données incluant les caractéristiques géographiques et sociodémographiques du terrain d'étude considéré selon une approche multiscalaire ;
- **Module P : modélisation des processus.** Ce module permet de simuler les mobilités urbaines et l'évolution de la population en tenant compte de l'évolution de la population ;
- **Module I : modélisation des impacts.** Ce module propose un ensemble d'indicateurs permettant d'évaluer les impacts des simulations effectuées, sur les trois sphères du développement durable (économique, sociale et environnementale) ;
- **Module G : modélisation graphique.** Ce module permet de visualiser les résultats sous la forme de cartes et de graphiques (il intègre un sous-module de géovisualisation), et de les exporter dans différents formats ;

L'organisation des quatre modules de base et des sous-modules qui les composent peut être visualisée sur le Grand Schéma MobiSim (GSM). Plus qu'un simple plan du programme, le GSM permet également d'organiser le travail et de répartir les tâches au sein de l'équipe de travail et d'expertise de MobiSim. Il apparaît donc comme un document nouveau et important pour le développement de MobiSim-ThéMA.

Chaque question posée au programme peut alors faire intervenir une combinaison spécifique de modules, tous n'étant pas toujours nécessaires. De même, il n'y a pas véritablement d'orientation dans la lecture et l'utilisation des modules de MobiSim : le GSM ne se lit pas nécessairement de gauche à droite (bien que la lecture se fasse dans ce sens dans la grande majorité des cas) ; le programme peut être mobilisé en « zigzag » pour accomplir des tâches spécifiques. L'exemple des étiquettes énergétiques (que nous développerons dans le point 4.2) illustre un tel parcours :

- les données sont mises en forme par le module D1 (mais les caractéristiques sociodémographiques de la population ne sont pas nécessaires, le S-module D11 n'est donc pas utilisé) ;
- le S-module I32 est ensuite au cœur de l'analyse : une boite de dialogue permet de paramétrer l'ensemble des éléments à prendre en compte et de lancer les calculs en conséquence ;
- pour lancer ces calculs, le S-Module I32 fait intervenir des éléments du module P2 qui gère la question des mobilités quotidiennes, en sollicitant notamment les S-modules P22 et P23 qui permettent d'estimer les déplacements à partir de chaque zone ;

- l'ensemble est finalement rendu dans le module de visualisation et de géovisualisation graphique de MobiSim, qui permet de visualiser les résultats sous la forme de graphiques et de cartes.

Bien qu'elle reste très théorique, la mise en place de ce schéma apparaît aujourd'hui comme un véritable outil de travail : il montre ce que contient le programme[6] et permet de distribuer les tâches pour son développement. Ainsi, **si certains modules présentés dans le GSM (en annexe) sont aujourd'hui finalisés et parfaitement opérationnels, d'autres n'existent encore que sur un plan théorique et/ou formel, alors que d'autres encore ne sont véritablement qu'à l'état de projet.** Ces « projets » font évidemment partie des développements à venir dans MobiSim, à plus ou moins long terme.

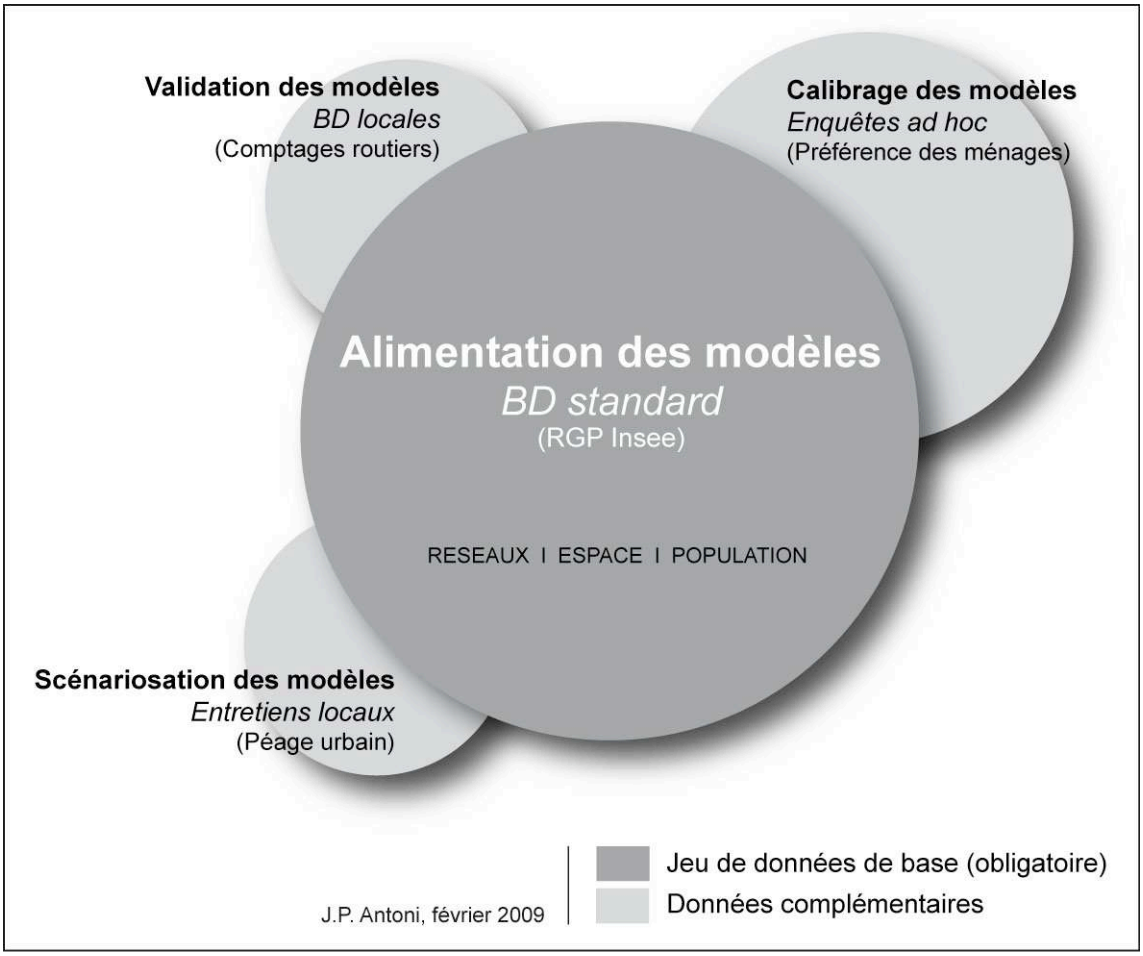
2.5. Les quatre sphères de données MobiSim

Dans cette troisième partie, nous évoquons la question de la validation des résultats de MobiSim. En effet, compte tenu des modèles théoriques implémentés dans le programme, la production de simulations et de résultats est relativement aisée. Cette production est toutefois soumise à un certain nombre de paramétrages et de calibrages intrinsèques à chaque modèles, parfois proposés en libre choix à l'utilisateur qui peut les utiliser comme autant de « leviers » pour simuler différents scénarios. Indépendamment de ces choix spécifiques, qui correspondent en fait à l'introduction d'un scénario à simuler dans le programme, il est nécessaire que ces résultats soient validés, i.e. de savoir dans quelle mesure il correspondent ou reproduisent une réalité connue. Il va donc de soi qu'il est nécessaire de connaître la réalité pour la simuler, ce qui passe par l'acquisition d'un certain nombre de données.

L'acquisition de données adéquates est un problème complexe, et constitue souvent un écueil de la modélisation en sciences humaines. En effet, de nombreuses données indispensables au calibrage des modèles ne sont souvent que très difficilement disponibles, parfois abordables uniquement par l'intermédiaire d'enquêtes spécifiques… et donc chères. Pour pallier ce problème, la version SMA de MobiSim était ouvertement gourmande en données : il était impossible de faire « tourner » le modèle sans une batterie de données préalablement recueillies, souvent difficile à obtenir, ce qui a pu entraver la conduite de certaines études.

[6] Nous avons d'ailleurs ajouté un module de « Fret urbain » qui permettra à terme d'intégrer la programme FretUrb à la problématique traitée par MobiSim.

Figure 2.5.1.
Les quatre sphères de données MobiSim



Pour pallier une partie de ce problème de données, nous faisons ici une proposition qui peut paraître audacieuse d'un certain point de vue, mais qui se justifie par le caractère exploratoire et expérimentale de MobiSim dans sa version ThéMA[7]. L'idée consiste à différencier des

[7] Cette proposition a d'ailleurs été vivement débattue lors de la réunion du Comité de pilotage du 23 janvier 2009, opposant les partisans d'une approche universaliste à ceux d'une approche plus nominaliste autour de la question de la recherche d'invariants dans la pratique de l'espace urbain et des mobilités quotidiennes. Nous prenons ici résolument partie pour l'approche universaliste, mais tenons évidemment compte également des remarques formulés par le Comité de pilotage, concluant que la rigueur et la cohérence de la proposition ne peut finalement être évalué qu'au cas par cas.

données dites générales (accessibles aisément et utilisables de façon standard quel que soit l'aire urbaine étudiée) et des données dites spécifiques, dont l'acquisition, le format, la validité et la date sont nettement plus aléatoires, dépendant à la fois de l'aire urbaine étudiée et de l'organisme à l'origine de la collecte ou de la commercialisation des données. Cette distinction nous conduit à considérer quatre sphères de données au total. Chacune fait référence à un type de données spécifiques et s'associe à une opération précise dans MobiSim : alimentation, calibrage, validation et scénarisation des différents modèles.

a. La sphère d'alimentation des modèles

Cette sphère constitue **le jeu de données de base qui permet de construire l'état initial de l'aire urbaine étudiée ; il intègre des données standard concernant l'espace administratif et ses découpages, la population et ses caractéristiques sociodémographiques, ainsi que des informations simples sur le réseau de routes et les transports en commun (TC). Ces données de base sont absolument indispensables pour débuter une série de simulations ; elles doivent pouvoir être mobilisées sur n'importe quel terrain d'étude, et donc être disponibles de manière identique à peu près partout.** En France, les données relevées et commercialisées par l'IGN (BD Carto et/ou BD Topo) et par l'INSEE (Recensement général de la population, base SIRENE) répondent globalement à ces critères ; livrées selon un format standard et uniformisé, elles peuvent rapidement entre traitées de manière presque complète par le module D de MobiSim afin de constituer l'état initial de n'importe quelle portion de territoire français.

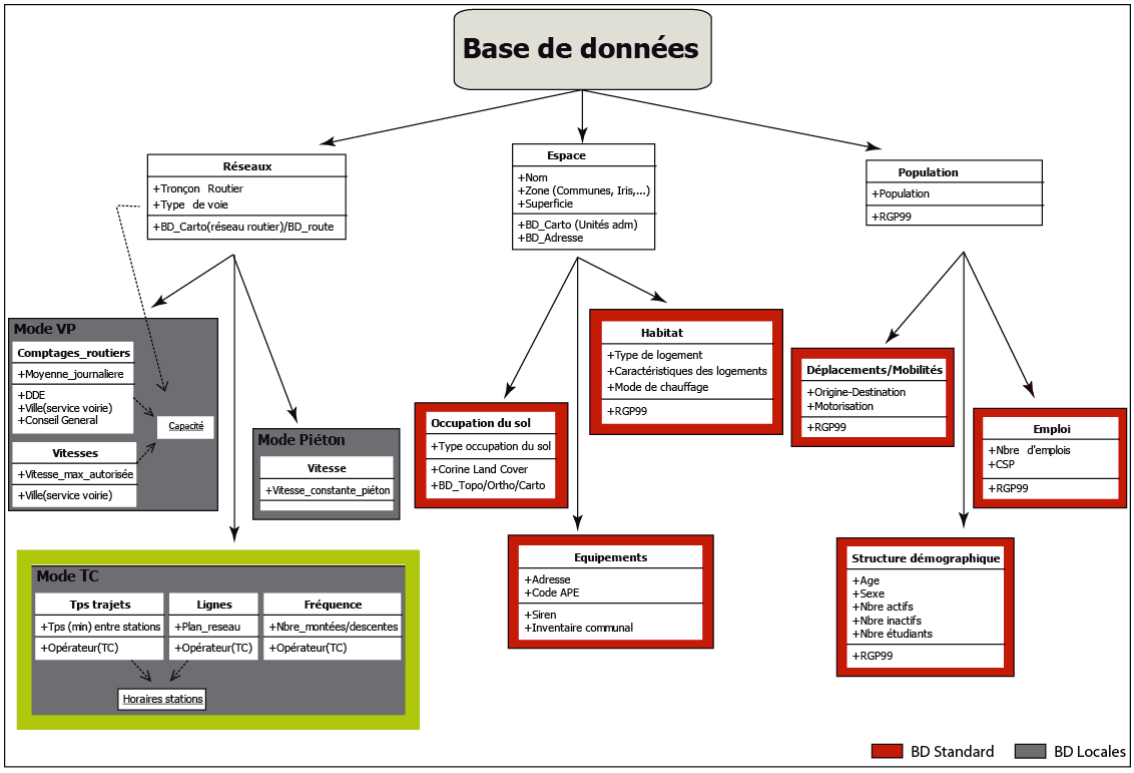
Seule une inconnue demeure : les systèmes de transport en commun, généralement à la charge des EPCI locaux, ne sont pas relevés ni par l'INSEE ni par l'IGN. Pour pallier ce problème, et sur la base des travaux effectués par ATN, **nous proposons ci-dessous un protocole permettant de relever les informations des réseaux de transport en commun** (bus et tram) afin de les intégrer dans le module D. Ce protocole est disponible en détail en annexe.

La figure 2.5.2, réalisée à partir des travaux de Caroline Molherat, illustre la composition de la sphère d'alimentation des modèles.

Mode TC : Protocole de numérisation du Réseau TC Besançon

La méthodologie développée ci-dessous s'intègre au module D12.
Dans le cadre où le réseau TC et tout ce qu'il peut englober (horaires, trajets, etc.) diffère d'une commune à une autre, une démarche particulière s'impose, passant de l'acquisition des données à leurs numérisations. La numérisation du réseau TC n'est pas systématique puisqu'elle dépend du bon vouloir des acteurs territoriaux et de l'operateur chargé du réseau de transport public et de ce fait du format dans lequel ils nous fournissent ces données…(papier, fichier Excel,…).

Figure 2.5.2.
La sphère d'alimentation des modèles ; une illustration



C. Molherat, Janvier 2009

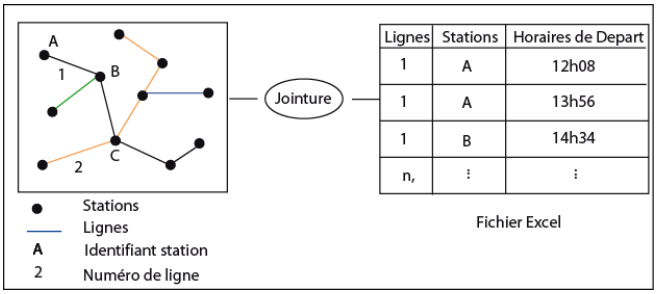
Quels types de données et où les acquérir ?
Au delà de l'opérateur en transports publics, il se peut que celui-ci soit un simple exploitant du réseau et qu'il faille réaliser une convention avec la communauté de communes ou d'agglomérations, organisatrice des transports afin d'obtenir ces données. Nous pouvons citer en exemple la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon, dans laquelle l'exploitation du réseau urbain GINKO est assurée par Keolis Besançon (filiale du groupe Keolis) tandis que l'exploitation du réseau périurbain est assurée par des autocaristes privés affrétés.

Numériser un TC :
Il s'agit de rendre exploitable le réseau TC sous un SIG en numérisant le réseau et les données qui le caractérisent (stations, temps de parcours, horaires à la station).
Il est important d'indiquer que le Réseau TC est caractérisé par des données : en points (stations, horaires à la station) et en lignes (arcs entre stations formant bout à bout la continuité des lignes de bus, temps entre stations).

Si le réseau TC est déjà numérisé sous un format MapInfo ou Shapefile, il faudra à l'aide d'un identifiant commun donné aux stations ou aux arcs, créer une jointure (sur ArcGis par exemple) avec un fichier Excel comportant des données horaires,….
Et pour finir, éditer ou affecter à chaque tronçon un temps de parcours entre stations dans la table attributaire.

Si le réseau TC n'est pas numérisé, il s'agira de recréer sous un SIG le réseau de transport défini par des objets en points et en lignes.

Figure 2.5.3
Principes de numérisation du réseau TC



Présentation du logiciel QuantumGis :

QuantumGis est un système d'information géographique libre disposant d'une interface graphique accessible. Il gère les formats d'image de type matriciel (Arc/Info ASCII Grid, GRASS Rasters, TIFF/GeoTIFF, USGS SDTS DEM, ...) et vectoriel (Arc/Info, ESRI Shapefile, Mapinfo File, ODBC, PostgreSQL, ...) ainsi que les bases de données. Outre la cartographie et la visualisation de données, QGIS permet actuellement de modifier, créer et ajouter des métadonnées aux couches vectorielles. Il est aussi possible de géo-référencer des rasters grâce à un plugin.

Dans QuantumGis : *Méthodologie pour numériser un réseau TC.*

1°) Afin de géo-localiser les stations puis les lignes sur le réseau routier, ajouter comme base de fond de carte la couche vectorielle de la BD Carto tronçon route.
2°) Le réseau se détermine par des nœuds (stations) = une couche en points puis par des arcs (temps entre stations) = une couche en lignes.
La première étape va être la création de la couche « station » permettant par la suite de concevoir des arcs entre ces points, la couche « temps », qui mis bout à bout forment les lignes de bus et de ce fait le réseau TC.

1 étape : *Edition de la couche stations*

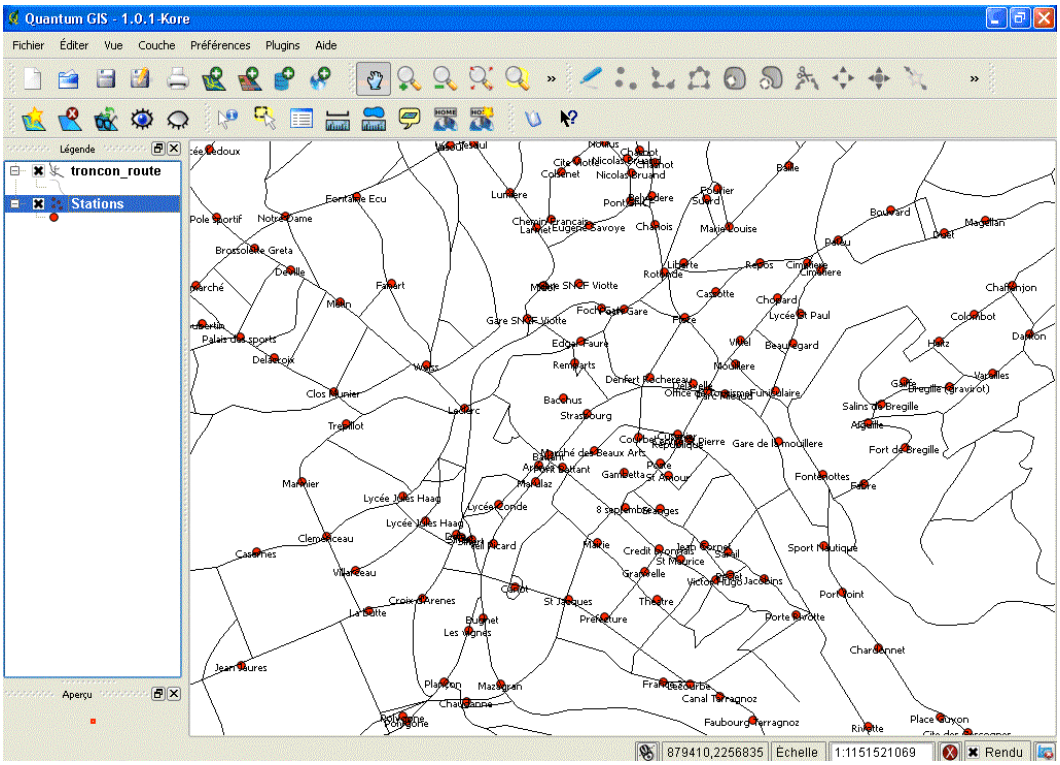
Sur QuantumGis dans le menu couche faire « nouvelle couche vecteur » afin de créer les champs de cette nouvelle couche.
- Sélectionner : « points » ;
- Donner un nom au champ attributaire : « Station » ;
- Type : « String » ;

puis « ajouter un attribut ».
Pour éditer une couche, passer en mode « Edition » avec le petit crayon se trouvant dans la barre de menu puis sélectionner le bouton « capturer le point ». Une fois la station géo-localisée une fenêtre va s'ouvrir nous permettant de renseigner l'attributs de l'objet que nous avons créé : le Nom de la station. Le point est alors créé.

Résultat après la saisie de toutes les stations du réseau avec en fond de carte la BD Carto.

Lorsque la saisie de toutes les stations est effectuée, il faut sauvegarder la couche en recliquant sur le crayon, mettant fin à l'édition. Avant de passer à la création de la deuxième couche, ne surtout pas oublier de lui donner un type de projection. Pour ce faire, se rendre dans le menu préférences « propriété du projet » puis « système de projection » et sélectionner la projection Lambert zone II.

Figure 2.5.4.
Un exemple à partir du SIG QuantumGIS



2 étape : *Edition de la couche Temps*

A travers cette couche il s'agira de créer des arcs reliant les stations les unes aux autres en affectant à chacun le numéro de la ligne, le temps de parcours entre ses 2 stations puis informer sur le sens de circulation des bus.

Sur QuantumGis dans le menu couche se rendre dans « nouvelle couche vecteur » afin de créer les champs de cette nouvelle couche.

- Sélectionner « ligne »
- Donner un nom aux champs attributaires : « Numéro», «Tps », « Sens Unique »
- Type : Numéro (Entier)
  Tps (Réel)
  Sens Unique (Entier) 0 = double sens
  1 = sens unique

Repasser en mode Edition avec le crayon puis sélectionner le bouton « capturer la ligne ».

ATTENTION

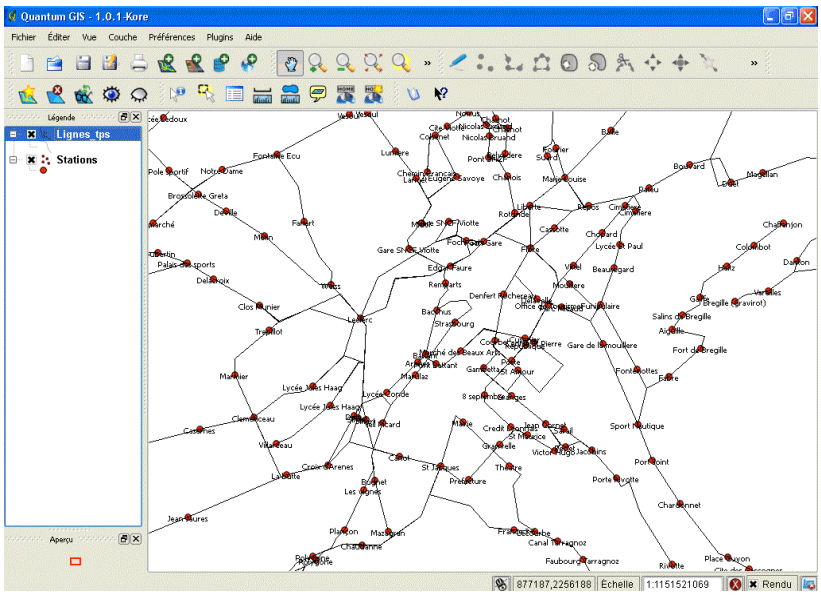
Avant de commencer la saisie n'oublier pas de vérifier l'option d'accrochage. Celui-ci permettra l'accrochage des arcs aux points. Pour ce faire, se rendre dans le menu « Préférence » puis « propriétés du projet », et enfin « option d'accrochage ».

- Cocher : couche station ;
- Mode : sur le sommet ;
- Tolérance de 30 ;

Se positionner sur une station, vérifier l'accrochage puis créer un arc de la station A à la station B tout en respectant BIEN le sens ou la direction de circulation de la ligne de bus.
Pour concevoir cet arc faire un clic sur la station de départ suivi d'un seul clic « droit » une fois positionné sur la station d'arrivée afin de valider la saisie. Une petite fenêtre s'affiche automatiquement permettant ainsi de renseigner les divers attributs de l'objet venant d'être créés.

Veiller à sauvegarder la couche en recliquant sur le crayon, mettant fin à l'édition.

Figure 2.5.5.
Un exemple à partir du SIG QuantumGIS



b. La sphère de calibrage des modèles.

La seconde sphère contient les données nécessaires pour calibrer les modèles ; elles ne décrivent plus un état initial, mais sont plutôt liées à **la description des comportements et des pratiques des individus et des acteurs dans l'aire urbaine étudiée. De par leur nature, elles ne sont donc pas accessibles dans des bases de données commercialisées dans un format standard, mais découlent de procédures d'acquisition plus complexes**

et plus spécifiques, comme des enquêtes par exemple. Pour prendre un exemple, ces données peuvent concerner les préférences des ménages en termes de localisation résidentielle : une enquête demandant aux chefs de ménages de placer par ordre décroissant d'importance les différents éléments et les aménités qu'ils souhaitent trouver à proximité de son logement peut apparaître comme une source d'information importante pour calibrer les modules MobiSim traitant de la question du choix et des préférences résidentielles, apportant du coup une réelle pertinence et une certaine validité à la modélisation envisagée.

Toutefois, mis à part le cas particulier des « enquêtes-ménages », il n'y pas d'uniformisation pour ce genre de données, qui apparaissent quasiment toujours relevées de manière *ad hoc*. De ce fait, il n'y a pas non plus de possibilité de décrire un protocole *a priori* permettant d'intégrer et d'utiliser ces données dans MobiSim. De même, l'existence même de ce genre de données de calibrage n'est absolument pas certaine : les enquêtes adéquates n'existent pas nécessairement ; elles peuvent être datées, ou ne recouvrir qu'une partie de l'aire urbaine étudiée.

La question qui se pose est alors de savoir dans quelle mesure des données ne correspondant que partiellement à la thématique modélisée et/ou au terrain étudié peuvent être utilisées pour calibrer MobiSim. Les pratiques de mobilité ou les choix résidentiels connus grâce à une enquête réalisée sur l'espace bordelais, peuvent-ils être utilisés pour une simulation sur l'aire urbaine de Besançon ? La réponse à cette question dépend évidemment des données précises, dont il faudrait étudier la qualité d'invariabilité d'une ville à l'autre. On sait par exemple que le population active d'une commune (population qui est donc amenée à se déplacer pour aller travailler chaque jour) est globalement égale à 40% de sa population totale, quelle que soit la commune considérée. Cet exemple ne signifie évidemment pas que toutes les données relevées à un endroit sont utilisables ailleurs et dans un contexte ; mais il montre que des invariants existent. L'identification de ces invariants constitue dès lors un enjeu important pour les simulations en général, et pour le calibrage de MobiSim en particulier, qui permettrait de limiter l'acquisition lourde de données par enquêtes, et de généraliser un certain nombre de constats quant aux pratiques de mobilité et aux choix résidentiels.

c. La sphère de validation des modèles.

La troisième sphère contient **les données liées à la validation des modèles. Ces données doivent en quelque sorte permettre de mesurer les écarts entre les résultats produits par les modèles et la réalité observée** : le modèle est il capable de reproduire une situation connue ? Dans quelle mesure s'en écarte-t-il ? Des écarts minimes ou « acceptables » permettent ainsi de valider le modèle, montrant qu'il est à la fois pertinent et efficace.

Cela étant, toutes les données utiles à la validation ne sont pas nécessairement inscrites dans un intervalle diachronique. Les données de comptage routier, par exemple, indiquent le nombre de véhicules qui passent chaque jour sur certains tronçons de route. Elles peuvent dès lors servir à valider les résultats du modèle à quatre étapes, dont l'objectif est justement d'évaluer le trafic sur les réseaux de transport.

De manière plus générale, une telle validation peut être mise en œuvre par l'intermédiaire d'un exercice de postdiction. La postdiction est alors au passé ce que la prédiction est au futur : à partir d'une situation antérieure connue, on tente de reproduire une situation actuelle connue elle aussi. Dans ce cas, il faut disposer d'un jeu de données décrivant la situation à un temps t et d'un autre jeu de données décrivant la situation au temps t+1. Dans ce contexte, toutes les données antérieures à une situation donnée ne doivent pas être considérées comme dépassées, mais peuvent au contraire constituer un corpus utile à la validation.

d. La sphère de scénarisation des modèles.

La dernière sphère concerne **la scénarisation des modèles. Elle ne contient pas véritablement de données, mais plutôt une série d'informations liées aux scénarios à simuler avec MobiSim.** Cette « mise en scénario » peut par exemple passer par une modification de l'état initial : que se passe-t-il si l'on ajoute une rocade d'autoroute pour contourner la ville ? C'est alors première sphère (celle qui contient les états initiaux) qui sera modifiée pour prendre en compte le nouveau contexte. Mais cette modification demande à ce que les nouvelles informations soient connues avec précision. De même, si l'on souhaite simuler l'impact d'un péage urbain, il est nécessaire de connaître les modalités exactes de la mise en place de ce péage : s'agira-t-il d'un péage en entrée et en sortie ? Sera-t-il permanent ou uniquement les jours de semaine ? Uniquement aux heures de pointe ? etc. Parallèlement, la seconde sphère, contenant les données liées au calibrage des modèles, peut également être modifiée par un scénario : que se passerait-il si la moitié des employés de tel secteur étaient contraints de se déplacer en transport en commun plutôt qu'en automobiles individuelles ? Et si leurs budgets de déplacement étaient subventionnés par les collectivités territoriales ? etc.

L'ensemble des informations de la quatrième sphère touche donc à la teneur des scénarios, qui n'est pas dénuée de dimensions politiques. En effet, si la modélisation concerne avant tout les modélisateurs, la mise en place des scénarios à simuler est souvent préparée par les édiles dans un contexte plus ou moins politique et dans le cadre d'un programme affiché ou non. Ainsi, on peut penser que ce sont des entretiens avec ces édiles, qui peuvent conduire à la constitution d'une base de scénarios. Chacun des ces scénarios devra ensuite être implémenté dans le programme de simulation, ce qui peut nécessiter un exercice de traduction parfois délicat.

4. Les développements de modules

Cette partie vise à présenter les innovations et les avancées récentes implémentées dans MobiSim. Parmi les six pistes identifiées comme des développements possibles dans la convention de départ (cf. la proposition de recherche associée à la convention 07 MT S 032, qui fait l'objet du présent rapport), deux ont finalement été explorées de manière approfondie : la première porte sur une typologie des mobilités urbaines, la seconde sur une évaluation des impacts énergétiques de l'urbanisation. **Comme l'annoncent les objectifs de MobiSim, ces deux développements tentent de s'adapter aux demandes initiées par les acteurs du territoire, pour lesquels MobiSim peut apparaître comme un outil de recherche appliquée**. La recherche portant sur les mobilités émane ainsi du Pays graylois en Franche-Comté, alors que la question des consommations énergétiques fait partie des recherches sur les étiquettes énergétiques actuellement lancées par l'ADEME.

4.1. Typologie des mobilités

Le territoire du Pays Graylois n'est pas *a priori* un territoire dont le fonctionnement s'associe à une métropole importante : Gray apparaît certes comme le point nodal du secteur, mais représente à peine plus de 6000 habitants en 2006. L'intérêt de cette région ne réside donc pas tant dans la polarisation que Gray peut exercer sur ses environs, mais surtout dans la complexité des mobilités observées dans le Pays. En effet, les activités y apparaissent fortement multipolarisées : les habitants du pays ne se tournent pas seulement vers Gray pour leurs activités professionnelles ou pour leurs achats, mais également vers Vesoul ou Besançon, qui apparaissent comme des éléments structurant dans la géographie des mobilités locales. Cette complexité dans les déplacements crée également une complexité dans l'organisation des transports. En effet, la superficie du territoire à couvrir et sa densité relativement faible ne permettent pas de mettre en place un système de transport en commun rentable, et condamne souvent les habitants à l'utilisation de la voiture comme mode de déplacement privilégié. Pour une part de la population, cette situation entraine une certaine fragilité : les populations vieillissantes des communes rurales rencontrent des difficultés à se déplacer. Une solution de transport à la demande pourrait alors apparaître comme une solution pour mettre en place une offre publique de transport en commun. Celle-ci existe d'ailleurs déjà en partie, mais fonctionne mal aux dires de l'association du Pays Graylois : les autobus mis à disposition ne circulent que dans des horaires très contraignants et apparaissent souvent sous-utilisés ; le système est loin d'être optimisé.

Pour améliorer la question des déplacements, il convient de mieux identifier la demande, i.e. de qualifier les populations « en demande » de mobilité, afin de tourner plus spécifiquement

vers elles les offres qui pourront être proposées. Ceci revient à construire une typologie des mobilités. La constitution d'une telle typologie est aujourd'hui en cours de réalisation au sein du laboratoire ThéMA où, outre l'équipe de modélisation MobiSim, elle mobilise également une équipe de trois étudiants de Master qui on fait de cette problématique le thème de leur Travail d'étude et de recherche (TER). Les résultats de cette étude, qui fait l'objet de rencontres régulières avec l'association du Pays Graylois, devraient rapidement fournir des éléments pour le paramétrage du module D1.

4.2. Consommations énergétiques

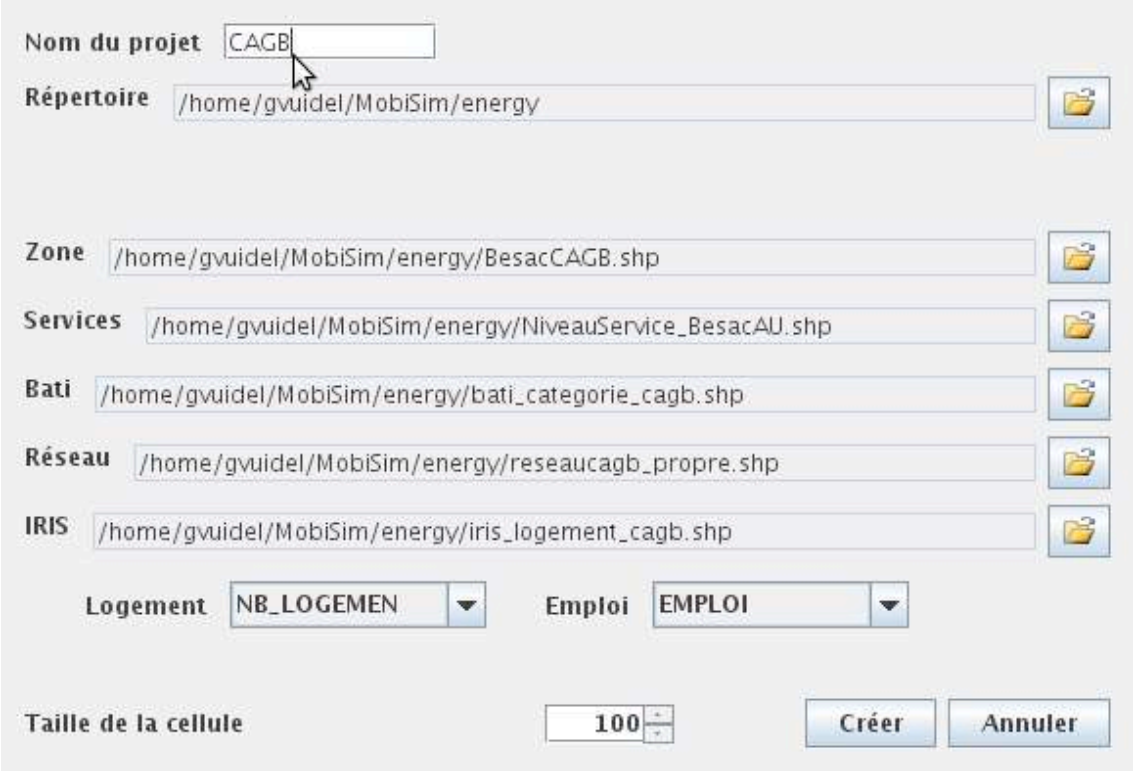
Le second développement de MobiSim concerne l'évaluation des impacts environnementaux des transports et de l'urbanisation. Il s'inscrit dans le cadre d'un contrat réalisé avec l'Ademe, qui vise à étudier la question des Etiquettes énergétiques territoriales. Ce projet part du constat que le changement climatique global est aujourd'hui à l'origine d'un objectif très concret de réduction des émissions de gaz à effets de serre, lui-même nécessairement corrélé à une réduction de la consommation énergétique globale (Facteur 4). Cette perspective se traduit par la définition d'objectifs en matière de maîtrise et d'amélioration de l'efficacité énergétique (Grenelle de l'environnement, Kyoto, Plan Climat, Directives européennes, etc.). Parallèlement, la pénurie annoncée des énergies fossiles (Pic de Hubbert), très directement impliquées dans les comportements de mobilité actuelle, est préoccupante sur le plan de l'efficacité énergétique et des économies d'énergie. Dans ce contexte, deux secteurs énergétiques retiennent particulièrement l'attention : l'habitat résidentiel (ou de fonction tertiaire) et la mobilité quotidienne (MEDADD, 2004 ; DGEMP, 2008). Ce constat permet d'identifier les domaines des transports et du résidentiel comme des secteurs particulièrement importants de la consommation énergétique, sur lesquels il pourrait être particulièrement intéressant de faire levier dans le cadre des objectifs de réduction cités précédemment.

a. Le projet d'étiquettes énergétiques

Dans ce contexte, l'efficacité énergétique devient un élément central de la planification urbaine et plus généralement de la planification territoriale. Elle est aujourd'hui prise en compte dans de nombreux documents spécifiques (Agenda 21, Schéma des services collectifs de l'énergie, PLU, SCoT, etc.). Pour autant, les questions énergétiques ne sont souvent considérées que par l'intermédiaire des émissions qui leurs sont associées, et n'apparaissent en définitive que comme des « sous-produits » de la question climatique globale (Magnin, 2007). Pour remédier à cet écueil, une des mesures proposées par le Grenelle Environnement vise désormais à mieux intégrer les préoccupations énergétiques dans les documents d'urbanisme (MEDADD, 2008).

De ce fait, l'intégration de spécificités territoriales tenant compte des pratiques spatiales des habitants (à travers une typologie relevant d'aspects spatiaux comme socio-économiques) semble incontournable pour évaluer la consommation énergétique différenciée de chaque territoire, notamment dans les secteurs de l'habitat résidentiel et/ou tertiaire et des mobilités quotidiennes. Aussi, l'ambition de ce projet consiste à évaluer ces « comportements énergétiques territoriaux » associés à chaque zone de l'espace géographique, en mettant en place un indicateur normatif appelé « Étiquette énergétique territoriale ». Il a donné lieu à la programmation du S-module I32 MobiSim (cf. Le Grand Schéma MobiSim en annexe), et est introduit ci-dessous.

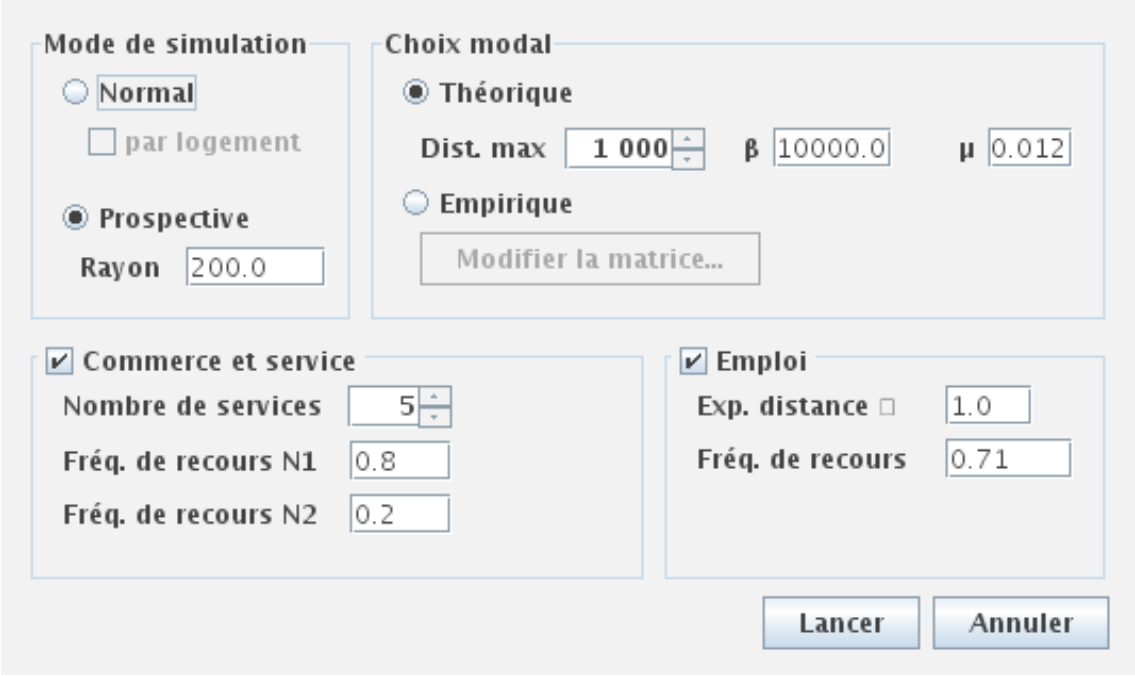
Figure 4.2.1.
Boite de dialogue MobiSim : les données d'entrée du module I32



Le module I32, développé en collaboration avec Yann Fléty, est classé parmi les modules d'évaluation d'impacts au sein de l'architecture générale MobiSim-ThéMA. Son objectif vise la définition d'indicateurs environnementaux liés aux consommations énergétiques. S'il ne s'agit pas ici de détailler l'ensemble des hypothèses et de la méthodologie sous-jacente, une introduction à l'application développée est proposée en trois étapes, reprenant les choix du menu de l'application, que sont successivement la préparation

des données d'entrée (Figure 4.2.1.), les choix relatifs aux modalités de simulation (Figure 4.2.2.) et les aspects liés à la géovisualisation. Enfin, et en guise d'illustration, deux cartes de résultats sont proposées (Figure 4.2.3. et 4.2.4.).

Figure 4.2.2.
Boite de dialogue MobiSim : paramétrage du module I32

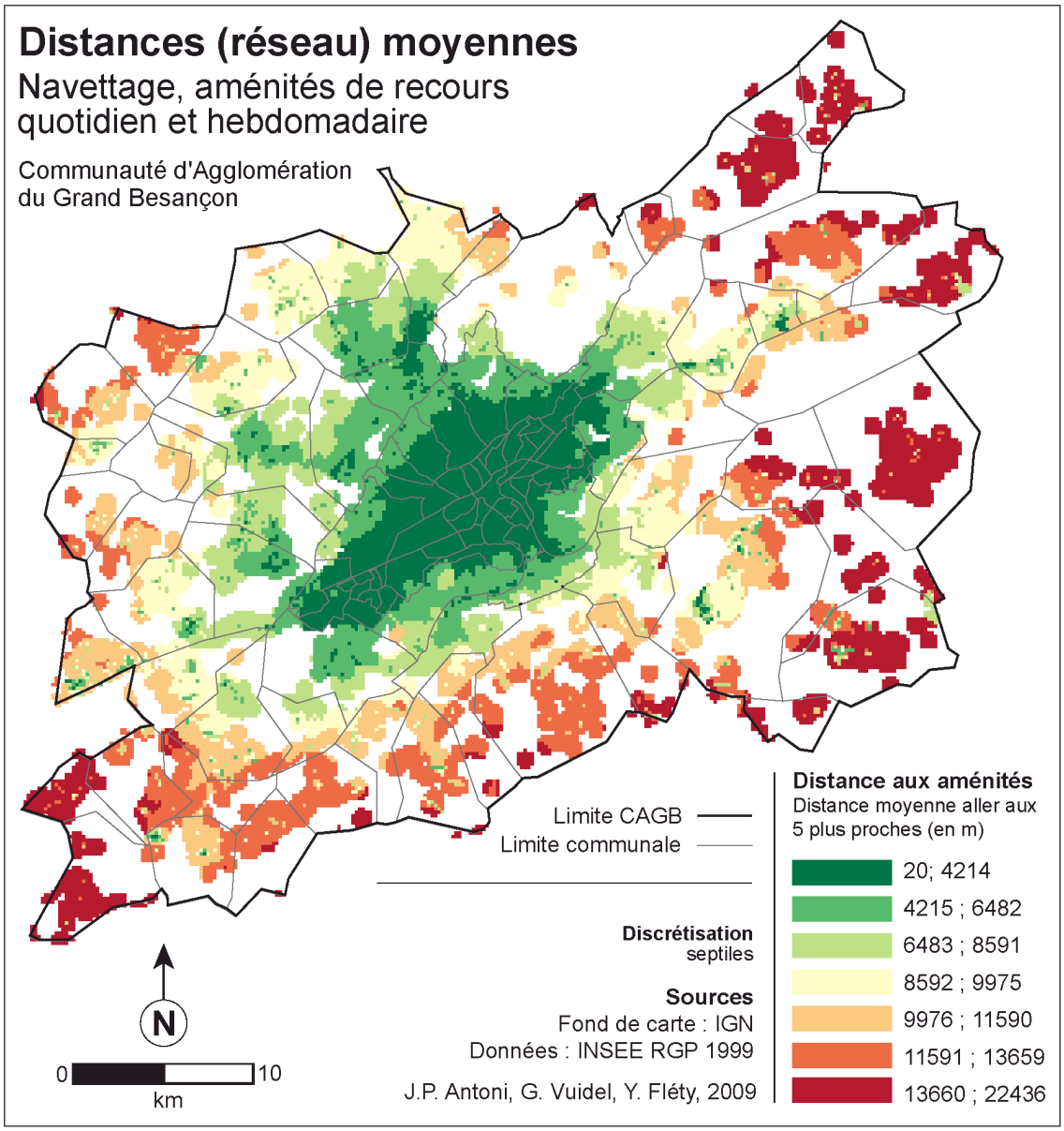


b. La production des données de base

Dans les boîtes de dialogue du programme, l'ouverture d'un nouveau projet nécessite la définition des données d'entrée. A partir de fichiers contenant des données géométriques et attributaires (fichier SIG au format ESRI Shapefile) relatives à la zone d'étude, aux services, réseau routier, bâti, logement et emploi, cette première étape vise la constitution d'une série d'images en mode matriciel, couches sources et supports de la simulation.

Il s'agit tout d'abord de considérer une zone plus large que la seule zone d'étude afin de se prémunir d'indésirables « effets de bords ». Il convient ensuite d'indiquer le fichier contenant les services, préalablement géoréférencés à l'adresse et classés selon leur niveau de fréquence de recours (N1: fréquence de recours quotidienne, N2: hebdomadaire). Le réseau routier, digitalisé en mode vecteur, et le bâti contenant les polygones individualisés du seul bâti résidentiel sont également requis.

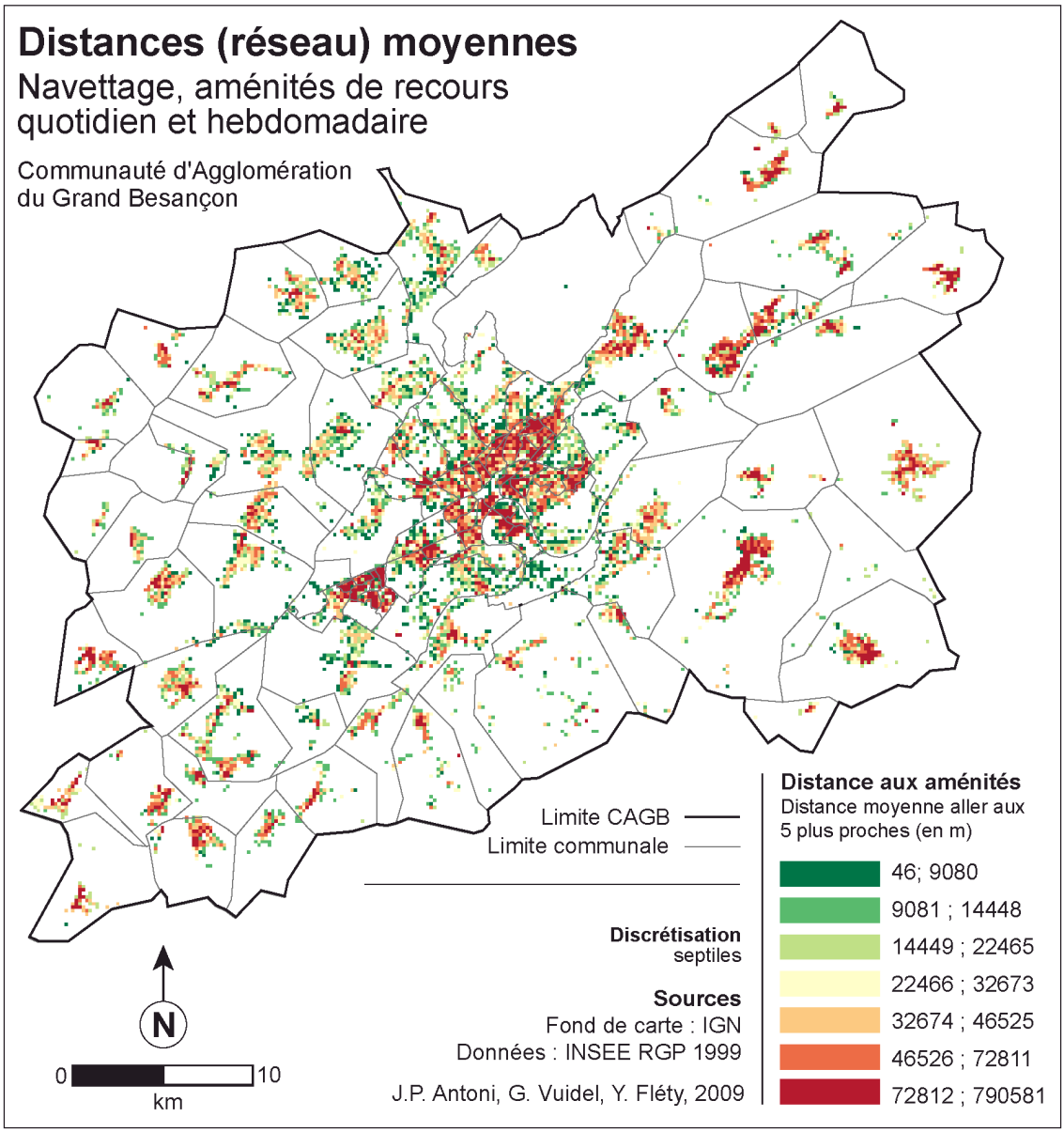
Figure 4.2.3.
Résultat illustratif du module I32 : distances quotidiennes aux aménités



La couche IRIS au sens INSEE, doit présenter deux champs qu'il convient de sélectionner, proposant respectivement les données relatives au nombre de logements par IRIS (lien avec le module D13) et ceux de l'emploi (module D15). Si l'ensemble du projet MobiSim repose sur la considération d'un espace cellulaire, c'est ici un avantage pour l'intégration de données hétérogènes. Il convient en ce sens de spécifier une taille de cellule de

travail, autrement appelée maille, contrainte par le module D21 relatif à la décomposition fractale. Outre les données précédemment évoquées, cette première étape s'inscrit dans l'approche résolument multiscalaire de MobiSim-ThéMA et fait en ce sens intervenir le module D23 relatif aux opérateurs de ventilation, notamment pour la répartition du nombre de logements par bâtiment puis par cellule.

Figure 4.2.4.
Résultat illustratif du module I32 : déplacements moyens aux aménités



c. Le paramétrage de la simulation

La seconde étape est relative au paramétrage de la simulation (Figure 4.2.2) sous la forme de quatre encarts qu'il convient de détailler :

- **Les deux modes de simulation (a).** L'encart (a) propose deux modes de simulation liés à la considération du bâti résidentiel. Si la première option, mode normal, ne considère que le bâti existant, la seconde, dite prospective, propose d'étendre cette évaluation sur une zone tampon supposée urbanisable dont le rayon peut être déterminé par rapport au bâti résidentiel existant. Par défaut, le rayon de cette zone tampon est fixé à 200m ;
- **Le choix modal (b).** L'intégration des choix modaux en deux alternatives est proposée par l'encart (b). La première option propose une évaluation théorique des choix modaux selon les distances parcourues le long d'une fonction logistique déterminant une répartition modale progressive entre le recours à la marche à pied et l'usage d'un véhicule particulier : le seuil de distance maximum effectué à pied est personnalisable et exprimé en mètres. La seconde proposition concerne l'intégration de choix modaux empiriques, à partir d'étude(s), par la modification d'une matrice : il est ainsi possible d'intégrer les probabilités de recours pour chaque mode en fonction de distances parcourues ;
- **Les commerces et services (c).** L'encart (c) s'appuie sur le module D14 considérant les aménités de type urbain. Il convient de préciser le nombre de services les plus proches considérés pour chaque niveau de service (N1, N2) ainsi que leur fréquence de recours ;
- **L'emploi (d).** Si le nombre d'emploi par IRIS fourni par le module D15 constituait une donnée d'entrée, l'affectation d'un déplacement à un lieu d'emploi est effectuée par le recours à un modèle gravitaire notamment géré par le module P21. En ce sens le paramétrage de l'exposant de la distance, présente au numérateur de ce mode de calcul, est paramétrable, tout comme le niveau de fréquence de recours à l'emploi.

Après avoir réalisé la simulation, des capacités de visualisation, discrétisation et d'export, que ce soit de cartes, de couches de données individuelles ou d'histogrammes sont offertes à travers des formats autorisant l'interopérabilité.

5. Points divers

Dans cette dernière partie, nous abordons divers points qui concernent les aspects organisationnels du projet MobiSim. Ces derniers ne font pas directement partie du projet de développement de la plateforme en tant que tel, mais concerne la gestion et la communication du projet. Ils apparaissent donc fondamentaux pour la prise en main structurée de MobiSim par ThéMA. Ces aspects organisationnels concernent notamment la constitution d'un comité de pilotage et d'experts, l'hébergement d'un site Internet dédié au projet, le calendrier des rencontres et des publications, etc.

5.1. Comité de pilotage

Pour répondre au caractère complexe et interdisciplinaire de la modélisation des mobilités urbaines et de leurs conséquences, l'équipe de développement MobiSim associe des chercheurs, des ingénieurs et des experts spécialistes dans des domaines de compétences divers, associés à des champs disciplinaires complémentaires.

L'équipe se compose d'un groupe de travail propre au laboratoire ThéMA qui constitue le noyau de développement du programme MobiSim. Cette équipe est entourée d'un comité de pilotage local et d'un comité de pilotage national, consultés régulièrement pour définir les grandes orientations des développements à venir. Enfin, plusieurs experts interviennent ponctuellement pour valider ou fournir un savoir faire particulier sur certains des aspects techniques requis par la modélisation.

a. Groupe de travail ThéMA

Jean-Philippe Antoni
Maître de conférences en aménagement et urbanisme
Responsable du projet Mobisim

Pierre Frankhauser
Professeur de géographie
Co-responsable scientifique du projet Mobisim

Pascal Bérion
Maître de conférences en aménagement et urbanisme

Modélisation trafic et transport

Cécile Tannier
Chargée de recherches CNRS
Modélisation spatiale et mobilités urbaines

Gilles Vuidel
Ingénieur de recherche
Conception, développement et optimisation informatiques

Jean-Christophe Foltête
Professeur de géographie
Modélisation des mobilités et du paysage

b. Comité de pilotage local

Dominique Ansel
Maître de conférences en psychologie
Laboratoire de psychologie sociale, Université de Franche-Comté

Bernadette Nicot
Maître de conférences en sciences économiques
Laboratoire interdisciplinaire de recherches économiques, Université de Franche-Comté

Thomas Thévenin
Maître de conférences en géographie
Laboratoire ThéMA, Université de Bourgogne

c. Comité de pilotage national

Gérard Brun, Michel Julien
Mission « Transports » de la DRAST
Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables MEDAD

Philippe Casanova
Ingénieur en modélisation
Ancien dirigeant de la société ATN

Yves Crozet
Professeur à l'université Lyon II
Laboratoire d'économie des transports LET

Anne Grenier
Urbaniste, Département « Bâtiment et Urbanisme »
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie ADEME

Christian Lebondidier, Damien Verry, Aurore Cambien
Groupe « Planification et Maîtrise des déplacements »
Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques CERTU

Dominique Mignot
Directeur adjoint de la recherche
Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité INRETS

d. Groupe d'expertise

Freddy Audard
Maître de conférences en géographie
Université d'Aix-Marseille UMR Espace
Expertise : Modélisation transports et mobilités (modèle à 4 étapes)

5.2. Site internet

La prise en main de MobiSim par le laboratoire ThéMA a permis l'achat du nom de domaine « mobisim.org » et la mise en place consécutive à cette adresse d'un site Internet dédié à ce projet. Modifié au rythme de deux mises à jour majeures chaque année, ce site vise un double but :

- d'une part, il s'agit d'afficher une « vitrine » de MobiSim. Cette dernière présente le programme, ses objectifs et ses ambitions en même temps qu'il offre quelques images de résultats produits à l'aide de MobiSim ;

- d'autre part, le site est également dédié au stockage et à l'échange d'informations internes, dont l'accès est réservé à l'équipe de travail et aux membres du comité de pilotage. Cette plateforme s'appuie notamment sur un système de gestion « wiki ». L'ensemble est intégralement géré au laboratoire ThéMA.

Parallèlement, le nom de domaine mobisim.org, offre également l'opportunité de créer un certain nombre d'adresse emails, utilisés pour diffuser des informations collectivement. Ceci permet notamment de diffuser une lettre d'information MobiSim qui parvient aux personnes inscrites quatre fois par an (soit une lettre tous les trois mois environ). Cette lettre présente l'actualité immédiate du projet MobiSim, tant pour les développements effectués que pour les projets et les contrats à venir ou les communications et les colloques dans lesquels la plateforme MobiSim est présentée.

5.3. Réunions et publications

Le temps de la convention qui fait l'objet du présent rapport a fait l'objet d'un certain nombre de réunions et de communications publiques, que nous recensons dans ce dernier point :

a. Communications et conférences

Antoni J.P., Frankhauser P., Tannier C., Youssoufi S., 2008, Simulating and assessing prospective scenarios - A comparative approach in urban planning, 8th Conference on Design and Decision Support Systems in urban planning, Eindhoven, Pays-Bas, Juillet 2008.

Antoni J.P., Frankhauser P., 2008, Modéliser différentes dynamiques à différentes échelles pour simuler la complexité des mobilités urbaines. L'exemple de MobiSim, Colloque de l'Association de sciences régionales de langue française (ASRDLF), Rimouski, Canada, Août 2008.

Antoni J.P., Frankhauser P., Le projet MobiSim : vers une complémentarité des modèles de simulation, Journées Recherche et Innovation - Commissariat Général du développement durable, Paris, France, Septembre 2008.

Antoni J.P., Vuidel G., Fléty Y., de Sède-Marceau M.H., 2009, Vers des indicateurs locaux de performance énergétique : les étiquettes énergétiques zonales, Neuvième rencontres ThéoQuant, Besançon, France, Mars 2008.

A venir – Territorial cohesion of Europe and integrative planning, 49th European Congress of the Regional Science Association International, Lodz, Poland, August 2009.

A venir – European colloquium on theoretical and quatitative geography, National University of Ireland Maynooth, Ireland, September 2009.

b. Réunions du comité de pilotage

13 décembre 2007, Réunion de lancement du projet MobiSim ThéMA, Besançon.

20 juin 2008, Première réunion du comité de pilotage, Besançon.

23 janvier 2009, Deuxième réunion du comité de pilotage, Paris.

12 juin 2009 (à venir), Troisième réunion du comité de pilotage, Lyon.

Conclusion

Pour conclure, et à la lecture des arguments avancés dans ce rapport de recherche, on peut dire que l'appropriation de MobiSim par l'équipe de développement du laboratoire ThéMA est aujourd'hui effective : les principes de la modélisation sont acquis, la programmation effectuée par ATN a été analysée, et des modifications ont été proposées, aboutissant à des développements nouveaux et originaux. Parmi les modifications effectuées pour aboutir à ces développements, trois pistes ont guidé les choix effectués :

- une modification de la structure du programme permettant d'intégrer les calculs en parallèle et d'améliorer les performances du programme en temps de calculs, écueil qui constituait l'un des problèmes majeurs de la version ATN. Dans ce cadre, **les nouvelles performances autorisées par ces changements n'ont pas encore été complètement mesurées, et constitueront l'objet d'une future recherche** ;

- une modification des concepts de la modélisation qui devrait permettre d'aboutir rapidement à une prise en compte totalement individus-centrée (type Système muti-agents) de la problématique de l'urbanisation et des mobilités urbaines ; ce développement passe par **une formalisation complètement finalisée de l'ontologie de MobiSim, aujourd'hui en cours de développement en parallèle avec les recherches effectuées dans le cadre du projet ANR Ecdesup** ;

- une simplification des données qui alimentent les modélisations, que nous proposons désormais de considérer à travers quatre sphères. Cette modification devrait d'une part permettre de simplifier la gestion des données au sein du programme, et d'autre part de rendre ce dernier moins gourmand en données *ad hoc* (et chères par leur coût d'acquisition). Toutes les données n'ont toutefois pas encore été collectées dans l'ensemble des quatre sphères présentées ; **un travail important de constitution de bases de données reste à faire**, notamment sur la Communauté d'agglomération de Besançon, mais également sur le territoire du Pays Graylois (Besançon et Gray constituant désormais deux terrains d'étude privilégiés pour MobiSim), et éventuellement sur la région parisienne (si les propositions de recherche lancées aujourd'hui, notamment auprès de l'ANR, aboutissent dans un délai raisonnable).

Enfin, il importe désormais de multiplier les expériences de modélisations à partir de l'outil MobiSim. Or, si l'on s'en tient au fonctionnement que l'équipe MobiSim souhaite conserver (cf. Introduction), cette multiplication ne peut aboutir à des résultats exploitables que si elle s'intègre dans des réflexions concrètes d'urbanisme et d'aménagement du territoire. Dans ce contexte, il importe de faire connaître le projet MobiSim (c'est l'objectif du site internet et de la lettre d'information envoyée régulièrement à près de 80 personnes impliquées dans les problématiques d'aménagement) et d'attirer les collectivités territoriales à l'usage qui peut en être fait, afin de multiplier les interlocuteurs qui permettront de développer des scénarios et de simulations, tant en fournissant des données sur des territoires différents, qu'en présentant des problématiques territoriales originales et complexes sur le plan de la problématique urbanisation / transport.

Bibliographie

ADEME, 2008, Le poids des dépenses énergétiques dans le budget des ménages en France, Lettre Etude et Stratégie n°11 du 3 avril 2008, Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, en ligne le 29/07/2008, http://www2.ademe.fr/servlet/list?catid=17390.

Agostinho J., 2005, Cellular Automata and Urban Planning Strategies. Using a Cellular Automata Land Use Model to establish different Scenarios of Growth, Abstracts of the 14th European Colloquium on Theoretical and Quantitative Geography, September 9-13, Tomar, Portugal.

Antoni J.-P., 2007, Jeux de simulation et représentation cartographique. In : Territoires du futur, n°7, pp. 49-59.

Antoni J.P., 2003, Modélisation de la dynamique de l'étalement urbain. Aspects conceptuels et gestionnaires, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur – Strasbourg I, 535 p.

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., 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. 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.

Berchtold A., 1998, Chaînes de Markov et modèles de transition. Application, aux sciences sociales, Hermes, 284 p.

Bonnel 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.

DGEMP, 2003, Les consommations d'énergie du secteur résidentiel et tertiaire par usage, Pages statistiques, Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières, en ligne le 29/07/2008, http://www.industrie.gouv.fr/energie/statisti/rt_energies_usage.htm.

DGEMP, 2008, Bilan énergétique de la France pour 2007, Rapport annuel de l'Observatoire de l'Energie, MEEDDAT, Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières, 30p.

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

Dubois-Taine G., Chalas Y. (edts.), 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 attractivity 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.

Fusco G., 2001, Conceptual modelling of the interaction between transportation, land use and the environment as a tool for selecting sustainability indicators of urban mobility, in Cybergeo, 12th European Colloquium on Quantitative and Theoretical Geography, St-Valery-en-Caux, France, 7-11 Septembre 2001, 20p.

Gilbert N., Troitszch 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

Grasland C., 1994, Limites politiques et barrières migratoires : l'exemple de l'ex-Tchécoslovaquie de 1961 à 1990. In : Gallusser W., 1994, Political Boundaries and Coexistence, UGI.

Guérois M. 2003. Les formes de villes vues du ciel, Thèse de géographie, Sous la direction de D. Pumain, Université de Paris I, 338 p.

Gusbin D., 2003 , Approche économique de la consommation d'énergie par le ménages, Séminaire Energie de l'Institut pour un Développement Durable IDD, 26 mai 2003, Gembloux, Belgique, users.skynet.be/idd/documents/energie/SE2P4.ppt.

Haas R., Auer H., Biermayr P., 1998, The impact of consumer behavior on residential energy demand for space heating, in Energy and Buildings (27), pp. 195-205.

Hagen-Zanker A., Straatman B., Uljee I., 2005, Further developments of a fuzzy set map comparison approach, International Journal of Geographical Information Science, volume 19, issue 7, p.769-785

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.

Holm E., Holme K., Mäkilä K., Mattson-Kauppi M., Mörtvik G., The microsimulation model SVERIGE; content, validation and applications, SMC, Kiruna, Sweden, 2004 (www.sms.kiruna.se)

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.

IWU, 2003, Deutsche Gebäudetypologie, systematik und datensätze, Dokumentation, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 9p.

King L.J., 1969, Statistical Analysis in Geography, Prentice Hall inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 288 p.

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 : Lanscape and Urban Planning, 56, pp. 21-33.

Magnin G., 2007, Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050 : Point de vue d'Energie-Cités, Point de vue, Energie Cités, en ligne le 11/01/2008, http://www.energie-cites.org/IMG/pdf/rapport_cas_opinion_energie_cites_oct_2007.pdf.

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

MEEDDAT, 2008, Synthèse des principales mesures de la loi d'orientation Grenelle de l'environnement, Site ministériel, Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire, en ligne le 2/08/08, www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/3._Synthese_des_mesures_cle092cd9-1.pdf.

Mitchell G., 2005, Urban development, form and energy use in buildings: A review for the solutions project, in EPSRC SUE SOLUTIONS consortium, University of Leeds, August 2005, 28p.

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.

Raux C., Traisnel J. P., Pochet P. et al., 2006, Analyse et modélisation des comportements transports-habitat-localisations, rapport de recherche R3, Projet ETHEL, Action Concertée CNRS – Ministère de la Recherche, LET, 141p.

Rimbert S., Cauvin C., 1976, La lecture numérique des cartes thématiques, Editions Universitaires de Fribourg, Suisse, 172 p.

Salingros N. 2003, Connecting the Fractal City, Keynote speech, 5th Biennal of towns and town planners in Europe, Barcelona, April 2003

Sanders L., Objets géographiques et simulation agent, entre thématique et méthodologie, Revue Internationale de Géomatique, Numéro spécial « Dynamiques urbaines et mobilités », à paraître.

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).

Weber C., Hirsch J. 1997, Potential model applications in planning issues, Proceedings of the 11th European Colloquium on Quantitative and Theoretical Geography, Durham Castle, City of Durham, UK, September 3-7.

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.

White, R., Engelen, G., and Uljee, I., 1997, The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land use dynamics. Environment and Planning B: Planning and Design, 24, 323-343.

Annexes

D Données
Data
D1 Caractérisation
Caracterization
D11 Population
Population
D12 Graphes et réseaux
Graphs and networks
D13 Logements
Housing
D14 Aménités
Amenities
D15 Emploi et activités
Employment and activities
D2 Approche multi-scalaire
Multi-scalar approach
D21 Décomposition fractale
Fractal decompsition
D22 Opérateurs d'agrégation
Cluster agregation operators
D23 Opérateurs de ventilation
Breakdown operators
D24 Générateur d'émergence
Emergence generator
P Processus
Processes
P1 Evolutions démographiques
Demographic evolutions
P2 Mobilités quotidiennes
Daily mobilities
P21 Distribution du trafin
Traffic distribution
P22 Choix modal
Traffic modal-split
P23 Affectation de trafic
Traffic assignment
P3 Transport et fret urbain
Urban freight transportation
P4 Mobilités résidentielles
Residential mobilities
P41 Préférences et évaluations
Preferences and evaluations
P42 Choix résidentiel
Choice of location
P43 Construction
Building
I Impacts
Impacts
I1 Indicateurs économiques
Economic indicators
I11 Congestion
Networks congestion
I12 Accessibilité
Accessibilité
I13 Tarification des trasnports
Transport tarification
I14 Coûts de fonctionnement
Functioning costs
I2 Indicateurs sociaux
Social indicators
I21 Satisfaction sociale
Social satisfaction
I22 Equité socio-spatiale
Socio-spatial equity
I23 Ségégation / spécialisation
Segregation / specialization
I3 Indicateurs environnementaux
Environmental indicators
I31 Emission de polluants
Pollutants emissions
I32 Consommation énergétique
Energu consumption
I33 Nuisance sonore
Noise pollution
I34 Forme urbain durable
Sustainable urban morphology
V Visualisation
Visualisation
V1 Navigation
Navigation
V2 Discrétisation
Discretization
V3 Cartes et graphiques
Maps and graphics
V4 Géovisualisation
Geovizualization