Formalisation des interactions spatiales dans les modèles multi-agents

Essai d'analyse comparative

Hélène Mathian[1], **Cécile Tannier**[2]

1. *UMR Environnement, ville et société*
15 parvis René Descartes, BP 7000, 69342 Lyon Cedex 7, France
helene.mathian@ens-lyon.fr

2. *UMR ThéMA, 32 rue Mégevand, 25030 Besançon Cedex, France*
cecile.tannier@univ-fcomte.fr

RÉSUMÉ. *Cet article propose une grille de lecture générique permettant d'expliciter les hypothèses qui sous-tendent la représentation des interactions spatiales (échanges de biens, d'information ou de personnes entre des lieux) dans les modèles multi-agents. Cette grille de lecture est définie et appliquée pour la comparaison de deux modèles,* Eurosim *et* Mobisim-MR. *Le premier simule l'évolution d'un système de villes européen (croissance et décroissance de la population de chaque ville) ; le second simule la dynamique des changements de localisation résidentielle des ménages dans une agglomération urbaine. La comparaison des modèles porte sur la définition des entités (les agents et leur environnement) et de leurs interactions. Cette comparaison montre que les deux modèles sont très différents du point de vue des entités modélisées et de leurs interactions, mais qu'ils présentent des analogies suggérant une unité de concepts des modèles géographiques en analyse spatiale.*

ABSTRACT. *In this paper, we propose a generic analysis framework, which allows us to make explicit the hypotheses underlying the expression of spatial interactions in agent based models. Spatial interactions are defined as the exchange of goods, information or individuals between places. The generic analysis framework is applied for comparing two models,* Eurosim *and* Mobisim-MR. *The first model simulates the evolution of the European system of cities (increase or decrease of the population of each city). The second model simulates the dynamics of residential location of households within an urban area. The two models are compared considering both the definition of the modelled entities (the agents and their environment) and their interactions. This comparison shows that the two models are very different concerning the modelled entities and their interactions. Nevertheless, they exhibit similarities suggesting a conceptual unity of geographical models in spatial analysis.*

MOTS-CLÉS : *simulation, modélisation multi-agent, interactions spatiales, objets géographiques.*

KEYWORDS: *simulation, agent-based modelling, spatial interactions, geographical objects.*

DOI:10.3166/RIG.25.393-414 © 2015 Lavoisier

1. Introduction

Nous proposons d'aborder dans cet article les questions que posent la formalisation et l'implémentation informatique de modèles multi-agents pour simuler l'évolution d'une configuration spatiale globale résultant de processus d'interactions spatiales (mobilité de biens, d'information ou de personnes entre des lieux) (Pumain, Saint-Julien, 2000).

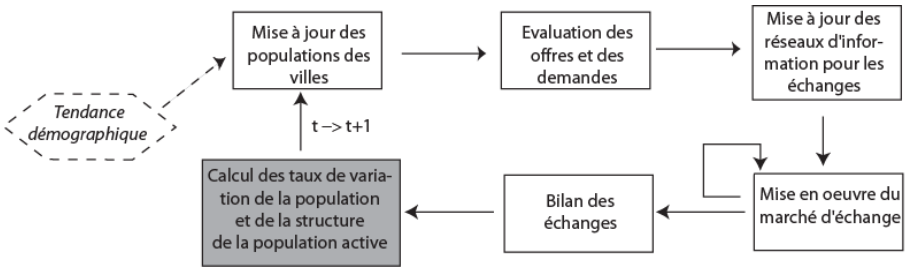
Pour ce faire, nous avons choisi de comparer deux modèles. Le premier modèle, Eurosim (Sanders *et al.*, 2006), simule l'évolution d'un système de villes européen (croissance et décroissance de la population de chaque ville). Le second modèle, Mobisim-MR (Tannier *et al.*, à paraître), simule les changements de localisation résidentielle des ménages dans une agglomération urbaine. Il permet d'étudier l'évolution de la population de chaque commune ou quartier de l'agglomération étudiée. Les entités spatiales observées sont donc agrégées dans les deux cas (villes dans un cas, communes et quartiers d'une agglomération dans l'autre). Ces entités spatiales sont en interaction car elles sont en relation *via* des échanges réciproques : flux de biens et d'informations en contrepartie de richesse dans le cas d'Eurosim ; flux de ménages dans le cas de Mobisim-MR.

Les deux modèles ont été développés dans un formalisme où la dynamique est modélisée au niveau élémentaire de l'agent. Les résultats des actions et interactions entre agents sont, eux, observés à un niveau agrégé (macro). Dans cet article, l'objectif est de mettre en évidence les analogies et différences de conception et de formalisation entre les deux modèles du point de vue de la définition des entités et de leurs interactions. Nous proposons une grille de lecture générique qui permet de distinguer les aspects communs des aspects spécifiques à chaque modèle. Après avoir rapidement décrit leurs objectifs respectifs et les hypothèses qui les sous-tendent, nous mettons en regard les entités de chacun des modèles et le contexte spatio-temporel dans lequel elles sont définies. Nous discutons ensuite les différentes interactions modélisées, qui constituent le moteur des dynamiques simulées. Enfin, ces modèles se situant tous les deux dans la catégorie de modèles descriptifs tentant de reproduire des faits stylisés d'après l'observé, nous abordons le rapport de chacun d'eux à l'empirique (observations, mesures…), tant en input qu'en output.

2. Eurosim et Mobisim-MR

Ces modèles ont été produits par deux équipes différentes de chercheurs, et ont induit des phases assez longues de conception, de développement et d'évaluation des simulations. Indépendamment des modèles théoriques desquels ils découlent, ces modèles intègrent tous deux un grand nombre de processus modélisés, en interaction les uns avec les autres. Ils répondent en outre à une même visée opérationnelle, qui est celle de la simulation de scénarios d'évolution prospectifs.

Le modèle Eurosim a été conçu pour explorer certaines dimensions du futur des villes européennes. Le modèle théorique sous-jacent repose sur une série de constats empiriques montrant que la trajectoire de population d'une ville dépend de ses interactions avec d'autres villes avec lesquelles elle forme un système (Berry, 1964). Les villes interagissent entre elles par le biais d'échanges (flux démographiques, financiers, de marchandises…) ; leurs dynamiques s'interprètent les unes par rapport aux autres : différentiels de croissance, de rythmes… Eurosim consiste en une implémentation partielle de ce modèle théorique explicatif (figure 1). Dans Eurosim, les villes sont caractérisées par leur taille (population totale), leur localisation, leurs spécialisations économiques et la composition de leur population active. Chaque ville est à la fois productrice – elle produit et offre des biens et services –, et consommatrice – sa population consomme et génère une demande de différents biens selon sa composition sociale. Les villes échangent entre elles dans le cadre d'un marché aux règles différenciées selon les produits, dans lequel s'exerce une compétition entre les villes. Le taux de variation de la population de chacune des villes découle du bilan de ses échanges commerciaux avec les autres villes, reflétant sa capacité à faire évoluer sa position dans le système de villes. Les échanges suivent des logiques différentes selon la nature des biens échangés. L'identité de chaque ville est fondée sur ses spécialisations économiques, appelées ici fonctions (administration, industrie, réseau, nouvelles technologies…). La variation démographique qui découle de la réussite ou non des échanges économiques entre les villes, se traduit par une croissance de la population active des secteurs les plus bénéficiaires. La structure d'activité de la population de chaque ville évolue donc au cours de la simulation : un secteur déficitaire (au sens de l'existence d'invendus) perdra des emplois et pourra même disparaitre ; au contraire, un secteur bénéficiaire sera considéré comme porteur pour l'économie de la ville et pourra se développer en attirant de la population active.



.

Figure 1. Organigramme d'un cycle correspondant à une étape de simulation dans Eurosim

Le modèle a été conçu pour simuler la trajectoire des villes sur cent ans entre 1950 et 2050. Il est calibré de manière à ce que la première partie de la période soit au plus proche des trajectoires observées. Il est utilisé sur la base de scénarios

(accroissement de la démographie, ouverture-fermeture de frontière commerciale…) et a donc une visée prospective, au sens de l'exploration des variations de trajectoires possibles.

Le modèle Mobisim[1] a aussi été conçu dans une visée prospective. L'objectif est d'identifier les conséquences possibles, sur l'organisation des flux de mobilité quotidienne et résidentielle, de scénarios d'aménagement (modification de l'offre de transport en commun, réduction de la vitesse de tronçons routiers, ouverture de nouvelles zones à l'urbanisation…) ou d'évolutions socio-économiques (hausse du prix du carburant, augmentation du nombre de familles monoparentales…). Dans cet article, nous considérons uniquement le module de simulation des mobilités résidentielles (Mobisim-MR) qui, au sein de la plateforme de simulation Mobisim, fonctionne en interaction avec d'autres modules, en particulier la simulation des mobilités quotidiennes, la simulation du développement résidentiel (construction de bâtiments résidentiels et de logements) et la simulation des évolutions démographiques (figure 2).

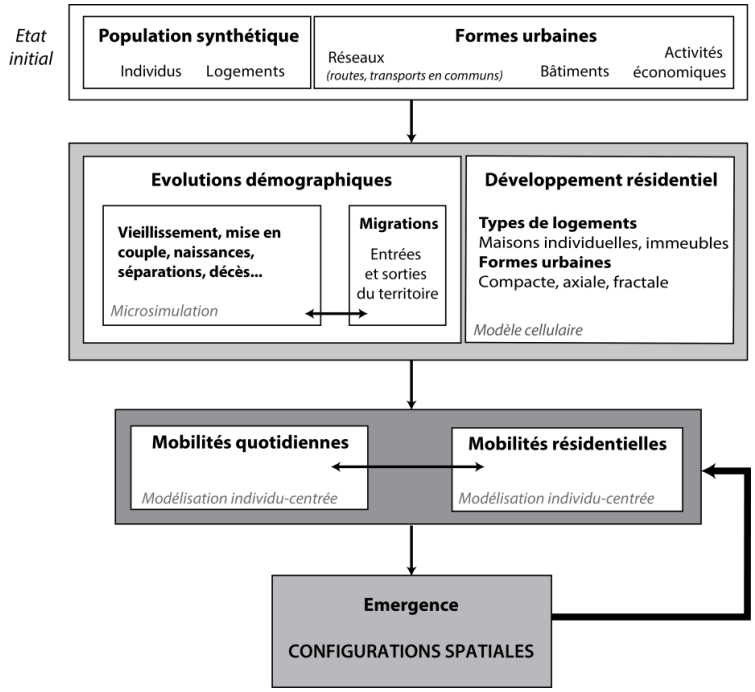


Figure 2. Les modèles dont l'enchainement compose la plateforme de simulation Mobisim

1. La dénomination Mobisim fait référence à l'ensemble de la plateforme de simulation (Antoni *et al.*, 2010), tandis que Mobisim-MR fait référence uniquement au module de simulation des mobilités résidentielles (Tannier *et al.*, à paraître).

La principale hypothèse à la base de Mobisim-MR est que la migration résidentielle, à l'échelle des ménages, résulte d'une interaction *push-pull* entre des éléments qui poussent le ménage à déménager *(push)* et des éléments qui l'amènent à choisir une localisation résidentielle plutôt qu'une autre *(pull)* (figure 3). Pour le volet *push*, le ménage évalue sa localisation résidentielle actuelle ; pour le volet *pull*, le ménage évalue les autres localisations résidentielles possibles, indépendamment de la nécessité de l'action de migrer. Les variables intervenant comme facteurs push et facteurs pull ne sont donc pas forcément les mêmes ; elles représentent des aspects qui ne sont pas évalués par les ménages selon les mêmes règles[2]. Qui plus est, l'importance d'une même variable est souvent différente selon qu'on la considère du côté push ou pull. Par exemple, la présence d'un espace vert de récréation à proximité du logement est, pour un jeune couple avec enfants, très importante en tant que facteur de satisfaction résidentielle (*push*), mais moins importante en tant que facteur de choix résidentiel (*pull*). Cette distinction entre facteurs push et pull est classique dans les modèles de dynamiques résidentielles (notamment de migration) (Ben-Akiva et Palma (de), 1986 ; Pellegrini et Fotheringham, 2002). Le plus souvent, ces deux composantes (push et pull) sont modélisées indépendamment l'une de l'autre (Nicolas *et al.*, 2009) ; dans Mobisim-MR, elles sont en interaction.

Le fonctionnement du marché du logement n'est pas modélisé, à la différence de nombreux autres modèles, par exemple celui de Filatova *et al.* (2008) ou d'Ettema (2011). En effet, dans notre modèle, nous supposons que l'évolution des configurations spatiales urbaines résulte principalement de différentiations spatiales en termes de site (paysage) et de situation (accessibilité aux emplois et aux différents types d'aménités) combinées aux caractéristiques sociales des individus (professions et catégories sociales ; préférence pour vivre en milieu urbain ou périurbain ; préférence pour se déplacer en voiture ou en transports en commun et modes doux) (Benenson, 1998).

La troisième hypothèse fondamentale dans Mobisim-MR est que les caractéristiques socio-économiques des ménages, notamment leurs revenus, n'ont pas forcément davantage d'influence sur leurs préférences en matière de choix résidentiel que leurs styles de vie. Tout un courant de recherche a en effet montré que les préférences et les choix résidentiels sont faiblement (ou du moins partiellement) corrélés statistiquement aux variables socio-économiques et démographiques caractérisant les ménages, exceptés leur étape dans le cycle de vie (Fernandez *et al*., 2005).

2. Dans Mobisim-MR, les formalisations adoptées pour représenter les règles d'évaluation sont soit des fonctions issues de la théorie des sous-ensembles flous (Yager, 1977), soit des fonctions d'utilité additives telles qu'on les trouve dans la *Multiple Attribute Utility Theory* (approche multicritère) (Keeney et Raiffa, 1976).

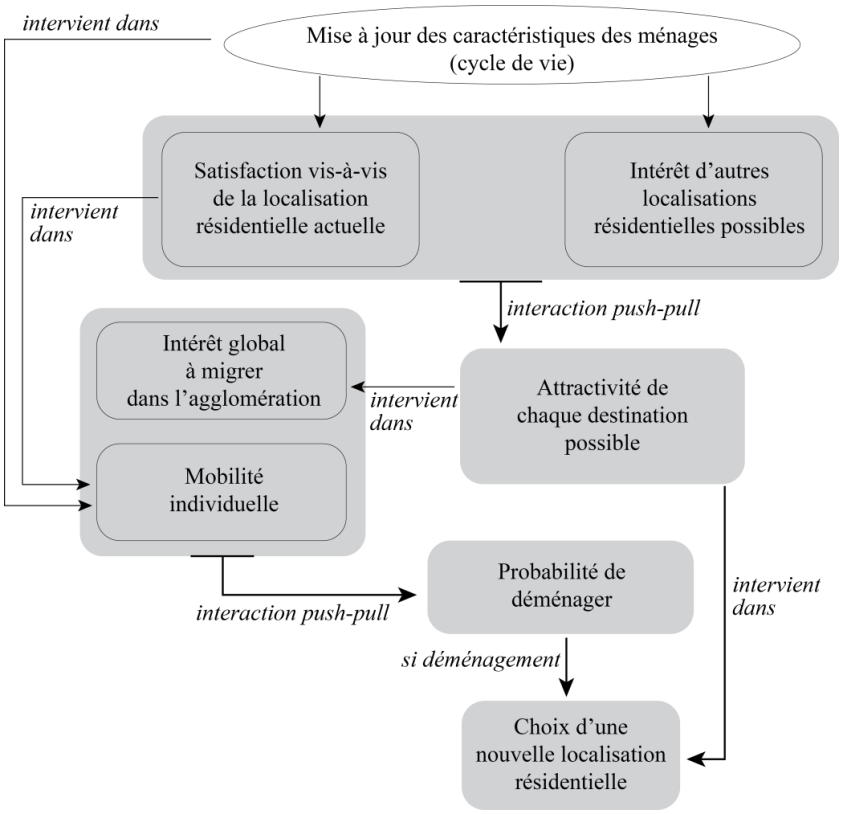


Figure 3. Enchaînement des variables calculées par le modèle Mobisim-MR

Eurosim et Mobisim-MR simulent donc chacun l'évolution d'un système spatial : un système ville et un système de villes. Dans les deux cas, il s'agit de saisir une dynamique en cours et de reproduire des faits stylisés (Banos, Sanders, 2013). Les deux modèles sont exploratoires : la dynamique est formalisée sur la base d'hypothèses sur les facteurs explicatifs des différenciations spatiales observées ; chaque modèle sert ensuite à explorer les configurations spatiales émergentes, dans le but de revenir ensuite sur les hypothèses des modèles (pour les infirmer ou les confirmer). Dans les deux modèles, les dynamiques simulées sont sur des échelles temporelles comparables, relativement aux entités modélisées et aux temporalités associées aux phénomènes étudiés : la dynamique d'Eurosim est ancrée sur une période de 100 ans, tandis que celle de Mobisim l'est sur 20 ans. La résolution temporelle des deux modèles est d'un an.

Chacun des modèles intègre des dynamiques exogènes, notamment la dynamique démographique. Dans Mobisim-MR, les caractéristiques démographiques des ménages évoluent au cours du temps. Les règles définissant l'évolution de chaque

individu composant un ménage sont définies au sein d'un module de simulation des évolutions démographiques (modèle de micro-simulation) qui simule le changement d'état des individus : vieillissement, naissances, décès, unions… Dans Eurosim, la démographie est pour partie endogène puisque c'est le résultat des échanges. Mais elle vient s'ajouter à une tendance qui, elle, est exogène et qui fixe, à chaque pas de temps, le taux de variation du nombre d'habitants commun à l'ensemble des villes. D'autres dynamiques exogènes interviennent également : dans Mobisim, l'évolution des prix du carburant est une variable exogène ; dans Eurosim, certains échanges entre les villes sont contraints par des portées maximales qui évoluent au cours du temps au fur et à mesure de l'augmentation de la vitesse des transports. Cette évolution de la portée maximale des échanges est une variable exogène dans Eurosim.

Les deux modèles étant brièvement présentés, nous proposons maintenant des éléments de comparaison des deux modèles en nous situant dans le domaine de la conception du modèle.

3. Les entités modélisées et la formalisation de la dimension spatiale

3.1. Entités géographiques et entités méthodologiques

Les deux modèles ont été développés dans un formalisme multi-agent appelé très généralement « individu-centré ». Dans les systèmes multi-agents, la dynamique est modélisée au niveau élémentaire de l'agent. Quand ces systèmes sont utilisés pour modéliser des interactions spatiales, les agents peuvent être des entités spatiales. Ceci a amené Benenson *et al.* (2002) à proposer la dénomination de modèles « entités-centrés » plutôt que « individus-centrés ».

Tableau 1. Positionnement des modèles Eurosim et Mobisim-MR selon les points de vue « thématique » et « méthodologique » définis par (Sanders, 2007)

Agent		**Point de vue méthodologique**	
		Modèle individu-centré : chaque agent est modélisé individuellement	Modèle agrégé : le modèle représente le comportement de groupes (agrégats) d'entités
Point de vue thématique	Un individu ou un ménage	*Mobisim-MR*	
	Une entité spatiale (quartier, ville…)	*Eurosim*	

Dans les modèles entités-centrés, les entités-agents (qui sont par définition des entités de niveau élémentaire) peuvent être aussi bien des individus ou des ménages que des quartiers ou des villes. Les entités spatiales peuvent aussi être des entités de niveau méso- ou macroscopique introduites pour modéliser des contextes ou observer des configurations spatiales, sans pour autant être conçues comme des agrégats. Ainsi par exemple, dans un modèle où les agents sont des « ménages », les quartiers d'une ville définissent un contexte dans lequel des agents « ménages » sont localisés. Mais dans un autre modèle, les quartiers peuvent constituer le niveau élémentaire de modélisation, et dans ce cas les agents-quartiers seront plus que la simple agrégation des ménages qui y résident : ils seront conçus comme des entités synthétisant tous les composants de niveau inférieur au quartier (ménages, acteurs de niveaux méso, services…) et les structures et interactions entre ces composants (organisation socio-spatiale des ménages, accessibilité des services, type de gouvernance…).

Sanders (2007) a clarifié davantage cette définition en introduisant une différenciation entre point de vue « thématique » et point de vue « méthodologique » (tableau 1). Celle-ci permet de caractériser les entités en croisant ces deux points de vue. Cette différenciation est extrêmement importante, dans cet article, puisqu'elle va fonder l'analogie entre les deux modèles. Ils sont semblables du point de vue méthodologique (modèles entités-centrés) tandis qu'ils se situent bien à deux échelons géographiques distincts du point de vue thématique.

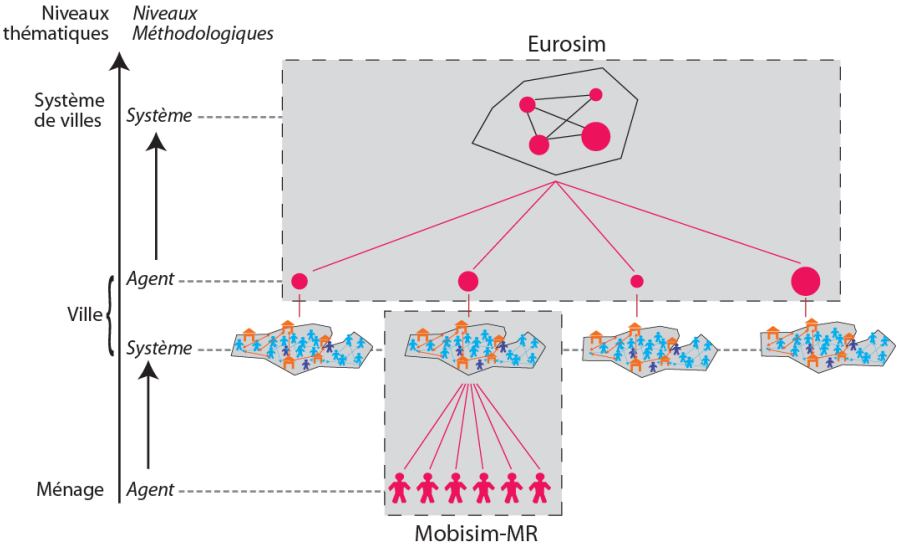


Figure 4. Entités thématiques et entités méthodologiques dans Eurosim et Mobisim-MR

Comme l'illustre la figure 4, dans Mobisim-MR, l'entité élémentaire modélisée est le ménage tandis que la ville est le niveau agrégé auquel est observé le fonctionnement du système. La configuration spatiale de la ville est donc le résultat du modèle ; c'est une abstraction au regard des processus individuels qui sont modélisés. Dans Eurosim, la ville, entité élémentaire du modèle, est considérée comme un tout, autonome et indivisible, et c'est le système de villes qui constitue le niveau agrégé auquel est observé le fonctionnement du système. Ainsi Mobisim-MR et Eurosim peuvent être appréhendés :

– d'un point de vue méthodologique, comme deux modèles « entités-centrés » dont les agents relèvent de niveaux géographiques distincts. Les agents agissent en système ; la dynamique de ce dernier résulte des interactions entre les agents eux-mêmes et/ou entre les agents et leur environnement ;

– d'un point de vue géographique, comme deux modèles pouvant être « couplés » pour couvrir la chaine de modélisation allant du ménage au système de villes.

3.2. La dimension spatiale

Dans Eurosim, les agents sont des villes, entités spatiales interagissant entre elles et avec leur environnement, l'ensemble des villes formant un système de villes. Mobisim-MR intègre, lui, deux types d'entités élémentaires : les ménages (qui sont des agents) et les logements localisés dans des bâtiments. Seuls les bâtiments sont des entités spatiales, possédant à ce titre des coordonnées géographiques et une géométrie.

Dans leur modèle, Benenson *et al*. (Benenson *et al*., 2002) envisagent la ville comme la superposition de deux systèmes interagissant : l'un composé d'entités mobiles (les individus) dont le comportement est défini en fonction d'entités immobiles (les infrastructures). De la même manière dans Mobisim-MR, les entités mobiles de niveau élémentaire sont des ménages réagissant à et interagissant avec leur environnement. Le comportement de ces entités peut être très divers. En effet, la mobilité résidentielle de chaque ménage dépend à la fois de l'ensemble de ses caractéristiques individuelles (588 combinaisons de caractéristiques sont possibles, donc 588 types de ménages) et des caractéristiques de sa localisation résidentielle actuelle et des autres localisations résidentielles possibles. Dans Eurosim, en revanche, aucune entité n'est mobile.

Dans Mobisim-MR, les agents-ménages sont localisés et la dynamique porte sur leur localisation. Dans Eurosim, les agents-villes sont aussi localisés dans l'enveloppe spatiale de la simulation, ici l'Europe, mais la dynamique ne porte que sur leurs attributs (population, structure de la population, richesse...).

Dans Mobisim, la ville est le support, l'enveloppe spatiale de la simulation. Il s'agit de la ville au sens de l'agglomération urbaine. Ses limites sont fixées et n'évoluent pas au cours du temps. En revanche, le modèle intègre le développement

résidentiel : de nouveaux bâtiments contenant de nouveaux logements apparaissent au cours du temps. Dans Eurosim, l'enveloppe spatiale de chaque ville n'est pas explicite.

La notion d'environnement est au cœur de la dynamique des modèles multi-agents (les agents réagissent à et/ou interagissent avec leur environnement), et la dimension spatiale y joue un rôle fondamental. Dans ce cadre, le terme « environnement » fait référence à la composition et l'organisation spatiale de l'espace environnant. L'environnement dans Eurosim et Mobisim-MR est composé d'entités spatiales représentées de manière explicite et absolue au moyen d'une géométrie et de coordonnées géographiques (les villes d'un pays dans Eurosim, les commerces et services environnants dans Mobisim-MR). La sélection des entités spatiales qui composent l'environnement d'une entité-agent donnée se fait souvent au moyen d'une explicitation de leurs relations dans l'espace : par exemple, l'environnement d'une ville commerciale est assimilé à son aire de chalandise définie comme étant l'ensemble des villes situées « à moins de 50 km » de la ville commerciale considérée. Cette sélection d'entités spatiales forment ce qui est souvent appelé un « contexte spatial » ou un « voisinage ». Dans Mobisim-MR, les logements sont localisés dans un environnement résidentiel dans lequel se situent un certain nombre d'aménités et d'activités (aménités paysagères, commerces, services, emplois, infrastructures de loisir et de récréation…). Leur présence contribue à l'attractivité des logements. Dans Eurosim, les villes ayant une fonction administrative prélèvent des ressources dans d'autres villes qui se situent à proximité. Une règle de proximité est associée à chaque fonction urbaine, définissant ainsi un voisinage. Le voisinage d'une capitale est le pays ; le voisinage d'une ville administrative régionale est un périmètre circulaire dont le rayon, schématisant l'accessibilité journalière de la ville, varie en fonction de l'époque. Dans les deux modèles, la notion de voisinage permet ainsi de définir des enveloppes spatiales, dans lesquelles vont être comptés :

– des services, des commerces, des aménités, des emplois dans le cas de Mobisim-MR pour contribuer au calcul de l'attractivité d'un logement. On distingue l'environnement résidentiel local, pour lequel les enveloppes spatiales varient entre 400 et 5 000 m selon le type d'aménités considérées, et l'environnement résidentiel global qui correspond à l'enveloppe spatiale de toute la ville.

– des villes et leur population dans le cas d'Eurosim, afin de calculer les ressources liées aux fonctions administratives et la richesse créée qui représente une capacité d'attraction. A fonction administrative égale, le surplus de richesse d'une ville associée à son niveau de fonction dépendra du nombre de villes comprises dans le voisinage.

S'il a été nécessaire de développer ce point de vue sur les voisinages spatiaux, c'est parce qu'ils définissent les enveloppes des potentialités d'interaction qui sont au cœur de la dynamique des systèmes modélisés.

4. Les interactions spatiales : moteurs et conséquence des dynamiques modélisées

4.1. Interactions entre entités et interactions spatiales

Essentielles dans les deux modèles, les interactions spatiales, c'est-à-dire les échanges entre les lieux liés à la mobilité de biens, d'informations ou de personnes, y ont toutefois un statut bien différent. Dans Eurosim, elles relèvent de logiques d'échanges de biens, services et informations entre les villes. La dynamique des agents (évolution de la population de chaque ville) résulte de ces interactions. Dans Mobisim-MR, la relation est inverse : les interactions entre lieux (flux migratoires entre communes et quartiers d'une agglomération urbaine) résultent de la mobilité des ménages (migrations résidentielles individuelles). Une autre différence essentielle entre les deux modèles est que, dans Eurosim, la mobilité des biens, services et informations est observée au niveau où elle est modélisée (*i.e.* le niveau des villes), tandis que dans Mobisim-MR, la mobilité des ménages est observée à un niveau davantage agrégé qu'elle n'est modélisée. Les interactions entre lieux, à savoir les flux de mobilité résidentielle entre quartiers ou communes de l'agglomération étudiée, émergent à ce niveau géographique en tant que résultat de l'agrégation de l'ensemble des dynamiques résidentielles individuelles.

Ainsi les interactions, fondamentales dans les formalismes agents, donnent lieu dans les deux modèles à des interactions spatiales, quel que soit le niveau géographique des entités, soit directement, soit indirectement par agrégation. Le tableau 2 synthétise les différentes caractéristiques de ces interactions dans chacun des modèles.

Dans Eurosim, le moteur de la dynamique endogène au niveau des agents (celui des villes) est l'existence *d'interactions effectives entre les agents* au moyen de la simulation des échanges d'information, de biens et de services entre les villes. De ces échanges résulte la croissance ou décroissance de la population de chaque ville. Les mouvements de population entre villes ne sont donc pas simulés explicitement dans Eurosim. Dans Mobisim-MR, le moteur de la dynamique endogène au niveau des agents (celui des ménages) est le *différentiel d'interactions potentielles entre les ménages et leur environnement*, autrement dit l'attractivité différenciée des localisations résidentielles pour chaque ménage. L'environnement résidentiel de chaque ménage comporte d'autres ménages. Ceci permet de modéliser une interaction entre ménages, *via* l'environnement.

Dans les deux modèles, des mouvements (transferts) entre des lieux sont simulés. Il s'agit soit d'échanges d'informations, de biens ou de services entre villes, soit des migrations résidentielles des ménages. Les échanges de biens ou mouvements de personnes sont fonction de deux caractéristiques : d'une part, la plus ou moins bonne adéquation entre l'offre et la demande émanant de chaque lieu, d'autre part, une distance entre l'offreur et le demandeur. Ces deux caractéristiques sont déterminantes dans l'évaluation des échanges entre lieux, soit directement à ce

niveau comme dans Eurosim, soit au niveau des agents-ménages dans le cas des migrations résidentielles des ménages dans Mobisim-MR. Cette définition des interactions est très générique. Il est intéressant ensuite de voir comment ceci est spécifié dans chacun des modèles.

Tableau 2. Synthèse des interactions dans Eurosim et Mobisim-MR

	Interaction	**La distance intervient dans l'intensité des interactions**	**La distance n'intervient pas dans l'intensité des interactions**
Entre entités spatiales de niveau mésoscopique (point de vue thématique)	**Eurosim** = interactions entre agents-villes (échange d'information et de biens)	Les échanges commerciaux entre villes s'effectuent à l'intérieur d'un certain rayon	Les échanges de produits spécialisés se font sur la base de réseaux de villes spécialisées indépendamment de la distance
	Mobisim-MR = interactions entre quartiers ou communes d'une agglomération urbaine		Flux migratoires (agrégation des déplacements des ménages)
Entre les entités-agents et leur environnement (point de vue méthodologique)	**Eurosim**	Les villes administratives interagissent avec leur voisinage.	
	Mobisim-MR	La proximité spatiale augmente le potentiel d'interactions entre les ménages et leur environnement	

Dans Eurosim, le différentiel entre l'offre et la demande de biens émanant de chaque ville dépend de ses caractéristiques intrinsèques (fonction, nature de la production…). Si la logique d'échange associée à la fonction est spatiale, alors la portée maximale détermine le rayon de l'enveloppe à l'intérieur de laquelle une ville donnée peut échanger. C'est le cas des fonctions commerciales, et il s'agit alors d'interactions liées aux biens fournis par les villes, dont l'enveloppe spatiale évolue au cours du temps. Dans le cas des fonctions administratives, l'enveloppe n'évolue

pas au cours du temps : il s'agit soit du pays pour les capitales d'états, soit de la région pour les capitales régionales. Les interactions consistent en la fourniture de services par les villes administratives en échange du prélèvement de contreparties. Pour les autres fonctions, les échanges relèvent de logiques de réseaux selon les spécialisations des villes et non de logiques de proximité spatiale. Les échanges s'opèrent alors en plusieurs étapes : il y a d'abord constitution de réseaux potentiels d'échange autour de chaque ville offreuse suivant les règles associées à chaque spécialisation, telle que la complémentarité entre spécialisations ; à partir de ce réseau potentiel, un réseau d'échange d'information se constitue : seules certaines villes sont sélectionnées par les villes offreuses, à savoir les meilleures villes-clientes des étapes précédentes, et un sous-ensemble d'autres villes permettant le renouvellement partiel du réseau. Les villes « informées » expriment alors une demande, et un tirage aléatoire par itération est réalisé parmi ces villes jusqu'à ce que l'ensemble des demandes des villes sélectionnées dépasse ***k*** fois l'offre de la ville productrice, ***k*** étant un paramètre du modèle. Cette sélection de villes constitue le marché de la ville considérée au sein duquel les transactions seront effectives. La taille du réseau d'échange effectif n'est ainsi pas fixée *a priori* : au regard du réseau de villes « informées », seule une partie des échanges d'information se concrétisent par un transfert de biens et réciproquement, de richesse.

Le mécanisme de marché mis en œuvre dans Eurosim donne donc lieu à de multiples interactions, selon les spécialisations des villes et selon le point de vue de « l'offre » ou de la « demande », comme le montre la figure 5 pour une seule ville.

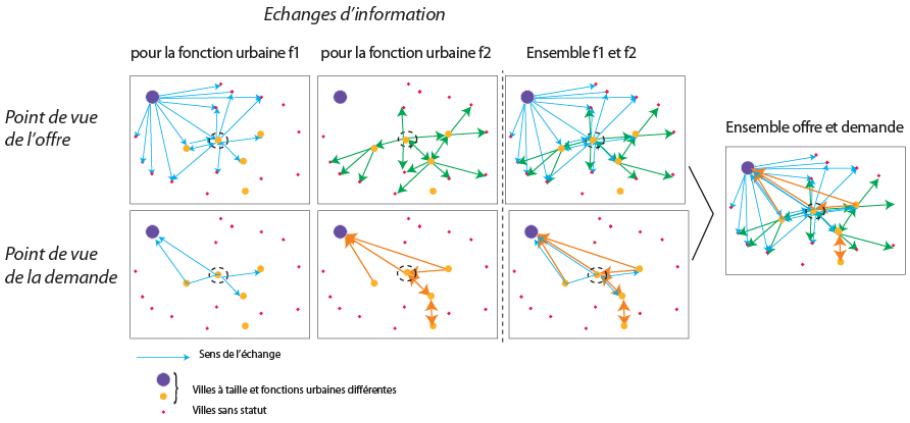


Figure 5. Exemple de superposition de réseaux d'interactions pour une ville

Dans Mobisim-MR, le différentiel d'attractivité entre un logement occupé par un ménage et un logement vacant dépend uniquement des caractéristiques de chaque logement (taille, accessibilité aux aménités…). La distance séparant le logement occupé et le logement de destination possible n'est prise en compte que

marginalement dans le modèle : en cas de séparation de familles avec enfants, les deux ménages monoparentaux résultant cherchent à se localiser à proximité l'un de l'autre dans environ 15 % des cas. (Ce seuil correspond à la part de ménages séparés optant pour une garde alternée des enfants). On sait par ailleurs que les ménages ont souvent une meilleure connaissance des logements vacants proches de celui occupé, mais ceci n'est pas modélisé dans Mobisim-MR. De même, l'influence des réseaux sociaux dans le choix résidentiel (proximité du logement de destination possible vis-à-vis de logements occupés par des amis ou des proches) n'est pas modélisée. Chaque localisation résidentielle représente simplement un potentiel de réalisation d'activités et de rencontres avec d'autres agents, en d'autres lieux de la ville (centres commerciaux, lieux d'emplois, espaces de loisir et de récréation…). Le potentiel d'interaction participe à hauteur de 40 % à la satisfaction résidentielle des ménages vis-à-vis de leur localisation résidentielle[3]. En revanche, il ne participe qu'à hauteur de 25 % à l'évaluation de l'intérêt des autres lieux de résidence possibles[4] car les caractéristiques du logement (taille, coût…) jouent davantage.

On clôturera ces développements sur les interactions en abordant la notion *d'attractivité* des lieux qui leur est liée. La notion d'attractivité est présente dans les deux modèles, mais intervient différemment : dans Mobisim-MR, elle est facteur de mobilité effective des ménages (mécanisme push/pull) et donc d'échanges entre les lieux. Dans Eurosim, elle n'est pas explicitement modélisée. La réussite économique des échanges d'une ville se traduit implicitement par une attractivité : le taux de croissance positif qui est associé à un bilan d'échanges positif correspond au bilan migratoire de la ville. Le taux de croissance d'une ville mesure donc indirectement son attractivité.

4.2. La dynamique des interactions

Dans les deux modèles Eurosim et Mobisim-MR, les potentiels d'interactions entre entités évoluent au cours du temps, en fonction des caractéristiques des entités modélisées et de celles du système dans son ensemble.

Dans Mobisim-MR, le potentiel d'interactions à partir de chaque logement entre les ménages eux-mêmes et entre les ménages et leur environnement évolue suite : 1) aux migrations résidentielles intra-urbaines qui amènent un changement de la composition sociale locale (dans un voisinage de 200 m autour de chaque logement) *via* l'arrivée et le départ de ménages de différents types ; 2) à la construction de nouveaux logements, qui entraîne une modification du paysage autour de chaque logement ; 3) aux changements de l'organisation des flux de mobilité quotidiennes

3. Les principales motivations d'un déménagement sont dans les faits assez variables, parmi lesquelles le souhait de quitter l'environnement résidentiel actuel quand celui-ci s'est dégradé.
4. Cette valeur correspond aux valeurs généralement obtenues dans les études de préférences révélées considérant, pour des villes françaises, les variables déterminant les prix des logements.

(évolution de la distance-coût entre chaque lieu de résidence et le centre-ville, évolution de la distance-coût généralisée à l'emploi depuis chaque lieu de résidence). Des phénomènes 1) et 2) résulte une modification de l'environnement résidentiel local de chaque logement. Du phénomène 3) résulte une modification de l'environnement résidentiel global. Par ailleurs, chaque ménage voit ses caractéristiques socio-démographiques évoluer, ce qui modifie son évaluation de l'attractivité des différents lieux de la ville. Par exemple, un jeune célibataire sans enfant sera davantage attiré par un petit appartement situé au centre-ville qu'une famille avec trois enfants.

Dans Eurosim, la dynamique associée aux interactions se lit à plusieurs niveaux. A chaque itération, les échanges entre les villes font varier les poids relatifs des différents secteurs d'activités dans chacune des villes. Ainsi, au sein d'une même ville les secteurs économiques « gagnants » voient leur population active augmenter, tandis que les secteurs « perdants » la voient diminuer. Sur cette nouvelle base vont être exprimées à l'itération suivante les nouvelles offres et les nouvelles demandes qui sous-tendent le marché des échanges. Les échanges associés aux fonctions commerciales évoluent conjointement à la vitesse des transports qui modifie la portée des échanges. Les échanges associés aux autres fonctions évoluent eux, pour partie, en fonction des échanges effectués les années précédentes: à chaque étape, les échanges effectifs se font sur la base de la structure d'un réseau de villes où s'échangent les informations. La structure de ce réseau dépend d'une part de la spécialisation des villes, mais intègre aussi une mémoire des échanges effectivement réalisés au cours des cinq années précédentes. Ainsi les interactions vont avoir tendance à se consolider autour des échanges fructueux.

Les agents dans Eurosim interagissent donc directement les uns avec les autres, tandis que dans Mobisim-MR, ils interagissent indirectement *via* la variable de composition sociale de l'environnement résidentiel. Cependant, cette différence ne semble pas essentielle d'un point de vue conceptuel. En effet, dans les deux modèles il existe la même boucle de rétroaction entre un agent et les agents qui composent son voisinage. L'hypothèse sous-jacente est que les agents établissent des relations (sociales dans le cas de Mobisim-MR ; économiques dans le cas d'Eurosim) avec certains agents qui sont proches d'eux socialement ou économiquement, et spatialement. Ainsi, dans les deux modèles les interactions ne se produisent qu'entre des entités de même nature : les villes interagissent avec les villes, et non avec les pays ou les blocs ; les ménages interagissent avec les ménages et non avec les commerces et services ou les lieux d'emplois.

5. Rapport à l'observé pour construire et évaluer les modèles

Nous n'allons aborder ici que brièvement cette question sachant que, dans le domaine de la modélisation pour la simulation, elle mérite autant d'attention que celle que nous venons de développer précédemment. Dans ce rapport à l'observé, nous distinguons quatre volets :

– l'initialisation du modèle,
– le calibrage des paramètres,
– l'évaluation de la cohérence des résultats simulés,
– la simulation de scénarios.

5.1. Initialisation du modèle

Les modèles Eurosim et Mobisim-MR permettent de saisir une dynamique en cours. Les agents ont en effet une histoire implicite derrière eux : les villes dans Eurosim ont un certain nombre d'habitants et de fonctions au départ ; les ménages dans Mobisim-MR ont un certain âge, éventuellement des enfants, une certaine localisation résidentielle.

Pour l'application de Mobisim-MR à une ville donnée, les données en entrée proviennent de différentes sources : bases de données standards françaises (Insee, référentiel à grande échelle de l'IGN), sources locales (enquêtes ménages-déplacements, réseaux de transports en commun), mais aussi simulations réalisées dans la plateforme Mobisim pour l'initialisation du modèle (création de la population synthétique de ménages et de logements, simulation des mobilités quotidiennes à l'état initial).

La situation initiale d'Eurosim repose essentiellement sur l'observation : données mesurées (population des villes en 1950[5]) ou points de vue experts concernant la distribution des fonctions urbaines dans les villes de plus de 200 000 habitants (Cattan *et al.,* 1999). Comme il n'existe pas d'observations relatives aux paramètres clés du modèle associés à la productivité et la demande par secteur économique, ces paramètres ont été estimés sur la base de modélisations statistiques (Sanders, 2006).

5.2. Calibrage des paramètres

En l'absence de données statistiques en France à l'échelle de l'individu ou du ménage, le calibrage du modèle Mobisim-MR, c'est-à-dire l'évaluation des domaines de variation des paramètres, se fait forcément à un niveau agrégé (l'ensemble de l'agglomération, les communes ou quartiers, ou encore les types de ménages). Dans le cas d'Eurosim en revanche, il est possible de calibrer le modèle en considérant non seulement le système de villes dans son ensemble, mais aussi chaque entité-agent car des données statistiques existent à cette échelle.

Le point commun d'Eurosim et de Mobisim-MR est d'intégrer des paramètres dont l'ordre de grandeur n'est pas connu. Dans Eurosim, il s'agit de paramètres « mécaniques » tels que, par exemple, la vitesse d'adaptation de la spécialisation des villes. Dans Mobisim-MR, de tels paramètres servent à représenter la part d'inconnu

5. Base de données Geopolis/Géographie-cités.

dans le processus de décision qui amène un ménage à déménager. En effet, la décision de déménager résulte d'un processus bien plus complexe que la seule évolution de la satisfaction résidentielle et des préférences des ménages au cours du temps. De nombreux autres facteurs interviennent : négociations intrafamiliales, expériences passées (y compris durant l'enfance), système de valeurs, attitudes… Ces phénomènes ne sont pas modélisés dans Mobisim-MR mais existent bel et bien. Pour modéliser cette part d'inconnu, il eut été possible d'introduire de l'aléa (*via* par exemple l'ajout d'un terme stochastique) dans le calcul de la probabilité de déménager de chaque ménage. Le choix qui a été fait n'est pas celui-ci : il a été de poser des hypothèses simplificatrices mais explicites d'un point de vue thématique pour modéliser la probabilité de déménager. Formaliser ces hypothèses a nécessité l'affectation de valeurs numériques à des variables dont on ne connait pas les ordres de grandeur, à savoir l'intérêt global à migrer et la mobilité individuelle (cf. figure 5).

Le calibrage des paramètres implique aussi une phase d'analyse de la sensibilité aux conditions initiales et aux valeurs de paramètres, ainsi qu'une analyse de la stabilité des résultats vis-à-vis de l'aléa contenu dans chacun des modèles. Nous prenons ici comme exemple cette dernière. Dans Eurosim, la majeure partie de l'aléa intervient dans le jeu du marché des échanges économiques, notamment dans la manière dont chaque ville « offreuse » répartit son offre sur les villes demandeuses. On peut établir une analogie avec le modèle Mobisim-MR qui comporte un tirage aléatoire des *n* localisations résidentielles potentielles évaluées par chaque ménage, ainsi qu'un tirage probabiliste des ménages qui déménagent : on retrouve ici le support potentiel des interactions, et les échanges effectifs entre lieux *via* les ménages qui vont effectivement déménager. Dans Mobisim-MR, cet aléa se combine avec les nombreuses fonctions de probabilités du module de simulation des évolutions démographiques. Par conséquent, quand on répète plusieurs simulations avec exactement les mêmes paramètres, les ménages qui déménagent à chaque itération ne sont pas forcément les mêmes et les configurations spatiales simulées peuvent varier. Cependant, on s'attend à ce que les résultats de simulation soient identiques à une échelle globale (part des urbains et périubains, nombre de déménagements, satisfaction résidentielle moyenne par commune ou par types de ménages). Dans Eurosim, l'aléa intervient ensuite dans le calcul du taux de variation de la population et dans la reclassification de la population active en fonction des secteurs gagnants ou perdants après les échanges. C'est donc la configuration spatiale des échanges entre les lieux et la structure de la hiérarchie des villes qui varient, et dont il faut évaluer la stabilité.

5.3. Évaluation de la qualité des modèles en termes de cohérence des résultats de simulation

La qualité des modèles est évaluée au regard de la cohérence des dynamiques globales simulées. Dans le cas d'Eurosim, l'objectif est de reproduire sur 1950-2000

les dynamiques passées. Dans le cas de Mobisim-MR, les simulations ne démarrent pas dans le passé, mais partent d'un état actuel. La cohérence des résultats du modèle est donc évaluée pour un scénario de prolongement des tendances actuelles sur vingt ans (tendances démographiques, coûts de transport actuels, préférences et styles de vie des ménages actuellement observés, reproduction des tendances passées pour la construction de logements…).

Dans les deux cas, l'évaluation de la cohérence des résultats ne suit pas la logique de validation d'un modèle statistique classique, qui consiste à confronter l'observé et le simulé considérant un même niveau d'agrégation. La démarche adoptée est, au contraire, celle d'un décalage systématique entre les niveaux de modélisation et de validation/évaluation. Pour Eurosim, le niveau de modélisation est la ville et le niveau d'évaluation est le système de villes (population totale de l'ensemble des villes, distribution rang-taille des villes et indice de primatie de la distribution). Pour Mobisim-MR, le niveau de modélisation est le ménage ; les niveaux de validation sont le quartier ou la commune (évolution de la population des quartiers/communes), un macro-zonage (proportion et types de ménages en zone urbaine ou périurbaine), et l'agglomération dans son ensemble (évolution de la satisfaction résidentielle globale, nombre moyen de déménagements par ménage sur 10 ans). Ce faisant, les données empiriques utilisées pour évaluer les résultats de simulation ne relèvent pas du même niveau d'observation que celles utilisées en entrée de simulation et pour fixer les valeurs des paramètres.

Un autre objectif est de déterminer à quel point on peut faire varier le comportement des entités-agents tout en restant dans un couloir de trajectoires possibles. En effet, le fait d'être sur un modèle « appliqué » (avec des données) fait que le couloir des possibles n'est pas infini. Par exemple, simuler une évolution qui amènerait Paris à avoir seulement 10 000 habitants ou une ville avec uniquement des habitants en périurbain ne fait pas partie du couloir de trajectoires faisant sens dans le domaine empirique.

5.4. Scénarios

La conception de scénarios consiste à modifier la situation initiale (par exemple, création d'une nouvelle ligne de transport en commun dans Mobisim-MR) et les éléments de contexte (par exemple, modification des tendances démographiques, ouverture/fermeture du rideau de fer dans Eurosim). Le but est ensuite d'analyser les conséquences de ces modifications sur les configurations spatiales simulées. La cohérence des résultats de simulation est évaluée pour chaque scénario.

Tableau 3. Eurosim et Mobisim-MR : une synthèse des caractéristiques

	Mobisim-MR			**Eurosim**		
Référentiel spatial	Une ville			Europe		
Référentiel temporel	20 ans			100 ans		
Pas de temps	1 an			1 an		
		Éléments dynamiques	**Éléments statiques**		**Éléments dynamiques**	**Éléments statiques**
Entité-agent	*Ménage*	Localisation Apparition, disparition Attributs : âge, nombre d'enfants, statut matrimonial, revenus Mode de transport préférentiel		*Ville*	Attributs : taille, fonctions, réseaux d'échanges	Localisation
Contexte spatial	*Voisinage local*	Composition	Portée des échanges	*Voisinage*	Composition Portée des échanges	
	Voisinage global (ville)	Composition	Portée des échanges Limites spatiales de la ville			
Autres entités	*Logements*	Apparition		*Pays*	-	Frontière
	Individus	Attributs : âge, ménage d'appartenance	Attributs : genre, revenu	*Bloc*	Tendance démographique	Composition en pays
	Quartiers/ communes	Attributs : ménages résidents	Limites spatiales			

6. Conclusion

Les modèles Eurosim et Mobisim-MR ont tous deux été conçus dans l'objectif de simuler l'évolution d'une configuration spatiale globale composée d'entités spatiales agrégées (villes dans un cas, communes et quartiers d'une agglomération dans l'autre). Ces entités spatiales sont en interaction car elles sont en relation *via* des échanges réciproques : flux de biens et d'informations en contrepartie de richesse dans le cas d'Eurosim ; flux de ménages dans le cas de Mobisim-MR. Les deux modèles sont géographiques dans le sens où les interactions spatiales sont au cœur des dynamiques modélisées. Cependant, dans les deux cas, tant les entités que les processus à l'origine des interactions spatiales sont modélisés de manière différente (cf. tableau 3). En particulier, les entités entre lesquelles sont observées des interactions spatiales sont des agents (*i.e.* des villes) dans Eurosim ce qui n'est pas le cas dans Mobisim-MR : les flux migratoires sont observés entre communes et quartiers d'une agglomération urbaine, lesquels ne sont pas des agents du modèle. Ainsi les interactions spatiales sont observées au même niveau qu'elles sont modélisées dans Eurosim, et non dans Mobisim-MR.

Les simulations avec Mobisim-MR permettent d'explorer quelles variables explicatives, parmi celles introduites dans le modèle, jouent plus ou moins sur la forme des interactions spatiales. En particulier, on cherche à déterminer si les variables ayant une dimension spatiale (distance au centre-ville, nombre de stations de transport en commun à une certaine distance…) et qui interviennent dans la décision individuelle de déménager, influencent peu ou beaucoup les interactions spatiales émergeant au niveau global. Mobisim-MR permet donc de mieux comprendre par la simulation. Il permet aussi de prédire, sous réserve d'un accord sur les faits stylisés (règles descriptives) introduits dans le modèle. En ce sens, Mobisim-MR peut être un outil d'aide à la décision pour l'aménagement urbain : comme il s'agit d'un modèle descriptif dont les règles sont explicites d'un point de vue thématique, il est possible de dialoguer tant sur les résultats du modèle que sur le modèle lui-même avec les personnes en charge de l'aménagement urbain. La simulation de scénarios prospectifs avec Mobisim-MR consiste donc en une « extrapolation à partir d'un modèle descriptif » telle que définie par Varenne (2010).

Eurosim permet aussi d'analyser les réponses du modèle à différents scénarios en explorant des changements locaux : que devient la dynamique d'une ville donnée si elle est soumise à une concurrence différente, par exemple *via* l'ouverture des frontières à certains échanges économiques ou bien la forte croissance d'une ville voisine ? Cependant, le premier objectif d'Eurosim est heuristique et consiste à explorer la capacité du modèle implémenté, issu d'un modèle théorique géographique, à reproduire la diversité des trajectoires de villes ainsi que la dynamique du système dans son ensemble.

D'après Varenne (2010), quand « (…) on explique un phénomène social en le faisant « croître » dans une simulation, on peut parfois expliquer et prédire (ou

rétrodire) à la fois. Et cela est assez nouveau pour les sciences sociales. Mais on le fait toutefois sans comprendre : on ne fait voir par là aucune unité conceptuelle ou théorique. Par conséquent, cette approche reste bien seulement une méthodologie : on n'obtient par là aucune nouvelle unité (qui serait une unité des objets, des lois, voire des concepts) des sciences sociales même si ces simulations sont souvent pluridisciplinaires ». Nous avons montré, dans cet article, que le formalisme des modèles entités-centrés nous a permis de construire une grille de comparaison pour deux modèles multi-agents issus de modèles théoriques très différents, et dont les entités et leurs interactions sont également différentes. Les analogies qui ont pu être mises en évidence dénotent une unité d'objets et de concepts pour ces deux modèles, Eurosim et Mobisim-MR. Une contribution à la construction d'un cadre théorique unificateur des modèles géographiques en analyse spatiale ?

Bibliographie

Antoni J-P., Vuidel G. (2010). MobiSim : un modèle multi-agents et multi-scalaire pour simuler les mobilités urbaines. *Modéliser la ville. Forme urbaine et Politiques de transport*. Antoni J-P. (dir.). Paris, Economica, coll. Méthodes et approches, p. 50-77.

Banos A., Sanders L. (2013). Modéliser et simuler les systèmes spatiaux en géographie. *Modéliser & simuler. Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*, F. Varenne et M. Silberstein (dir), collection sciences et philosophie, éditions Matériologiques, http://www.materiologiques.com/Modeliser-simuler-Epistemologies

Ben-Akiva M., Palma (de) A. (1986). Analysis of a dynamic residential location choice model with transaction costs. *Journal of Regional Science*, vol. 26, n° 2, p. 321-341.

Benenson I. (1998). Multi-agent simulations of residential dynamics in the city. *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 22, n° 1, p. 25-42.

Benenson I., Omer I., Hatna E. (2002). Entity-based modeling of urban residential dynamics: the case of Yaffo, Tel Aviv. *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 29, p. 491-512.

Berry B.J.L. (1964). Cities as systems within systems of cities. *Papers in Regional Science*, vol. 13, n° 1, p. 147-163.

Cattan N., Pumain D., Rozenblat C., Saint-Julien T. (1999). *Le système des villes européennes*. Paris, Anthropos, coll. Villes (1e édition 1994).

Ettema D. (2011). A multi-agent model of urban processes: Modelling relocation processes and price setting in housing markets. *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 35, p. 1-11.

Fernandez L.E., Brown D.G., Marans R.W., Nassauer J.I. (2005). Characterizing location preferences in an exurban population: implications for agent-based modeling. *Environment and Planning B*, vol. 32, n° 6, p. 799-820.

Filatova T., Parker D., van der Veen A. (2009). Agent-based urban land markets: agent's pricing behavior, land prices and urban land use change. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 12, n° 13. http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/1/3.html

Keeney R., Raiffa H. (1976). *Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs*, John Wiley and Sons.

Nicolas J.-P., Bonnel P., Cabrera J., Godinot C., Homocianu M., Routhier J.-L., Toilier F., Zucarello P. (2009). SImuler les MoBilités pour une Agglomération Durable - Rapport final du projet Simbad, Laboratoire d'Économie des Transports, Lyon. http://simbad.let.fr/documents/Rapports/Simbad_R9_Final.pdf

Pellegrini P.A., Fotheringham A.S. (2002). Modeling spatial choice: a review and synthesis in a migration context. *Progress in Human Geography*, vol. 26, n° 4, p. 487-510.

Pumain D., Saint-Julien T. (2000). Les *interactions spatiales*. Paris, Armand Colin

Sanders L., Mathian H. (2008). Expérimenter sur le futur des villes européennes avec un modèle multi-agents. *15e Journées de Rochebrune : Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels*, Rochebrune, France, 20-26 janvier 2008, ENST 2008 S001, Paris CD-ROM, p. 1-13.

Sanders L., Favaro J.-M., Glisse B., Mathian H., Pumain D. (2006). Intelligence artificielle et agents collectifs : le modèle EUROSIM. *Cybergeo*, n°392.

Sanders L. (2007). Objets géographiques et simulation agent, entre thématique et méthodologie. *Revue Internationale de géomatique*, Numéro spécial « Dynamiques urbaines et mobilités » C. Tannier et M-H. de Sède-Marceau dir., vol. 17, n° 2, p. 135-160.

Sanders L. (dir.) (2006). Final Report of Workpackage 4, *Dynamics of the European urban network of the project Time-Geographical approaches to Emergence and Sustainable Societies (TiGrESS).*

Tannier C., Hirtzel J., Stephenson R., Couillet A., Vuidel G., Youssoufi S. (à paraître). Conception and use of an individual-based model of residential choice in a planning decision process. *Feedback from an experimental trial in the city of Besançon*, France, *Progress in Planning.*

Varenne F. (2010). Les simulations computationnelles dans les sciences sociales. *Nouvelles perspectives en sciences sociales : revue internationale de systémique complexe et d'études relationnelles*, vol. 5, n° 2, p. 17-49.

Yager R. (1977). Multiple objective decision-making using fuzzy sets. *International Journal of Man-Machine Studies*, 9, p. 375-382.