Expérimenter sur le futur des villes européennes avec un modèle multi-agents

Lena Sanders, Hélène Mathian

▶ **To cite this version:**

Lena Sanders, Hélène Mathian. Expérimenter sur le futur des villes européennes avec un modèle multi-agents. 13e Journées de Rochebrune, " Expérimentation et systèmes complexes ", Jan 2008, Megève, France. pp.1-13. halshs-00258667

HAL Id: halshs-00258667
https://shs.hal.science/halshs-00258667

Submitted on 23 Feb 2008

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.

Expérimenter sur le futur des villes européennes avec un modèle multi-agents

Lena Sanders, Hélène Mathian
UMR Géographie-cités, Université Paris 1 – CNRS – Université Paris 7

Communication au : 13e Journées de Rochebrune, « Expérimentation et systèmes complexes », Megève 20-26 janvier 2008

Résumé

L'objet d'expérimentation est le système des villes européennes. Le texte est articulé autour des étapes suivantes : 1. justifier brièvement qu'un système de villes est un système complexe et présenter les questions qui vont donner lieu à une démarche d'expérimentation (notamment l'effet sur les dynamiques urbaines et leur différenciation de la présence ou non de barrières économiques entre les villes de l'Est et de l'Ouest européen) ; 2. décrire les principes de fonctionnement du modèle EuroSim : définition « d'agents-villes », formalisation des interactions entre les villes (réseaux évolutifs d'échanges économiques) et des règles d'évolution des populations urbaines en fonction du succès de ces échanges ; 3. analyser les sorties du modèle pour un certain nombre de villes-types et illustrer la diversité des « réponses » des villes en fonction de différentes perméabilités des frontières entre blocs géographiques (évolution de la population 1950-2050, évolution de la taille des réseaux d'échange, cartes des flux d'échanges). 4. Discussion sur les apports de connaissance d'une expérimentation à l'aide d'un modèle multi-agent. On évoquera en particulier le rôle de l'expérimentation relativement aux phases de vérification, calibrage et validation d'un modèle agent.

Introduction

En géographie les modèles de simulation représentent des outils privilégiés – sinon les seuls – pour expérimenter des phénomènes relatifs à la forme et à l'évolution des différenciations spatiales. L'objectif de cette présentation est de discuter les problèmes que soulèvent une telle démarche à partir d'un modèle, EuroSim, modèle agent simulant la dynamique des villes européennes entre 1950 et 2050.
Une question essentielle est celle de la validation. Une démarche scientifique classique nécessiterait qu'un modèle soit parfaitement validé pour être utilisé

à des fins d'expérimentation. Or, comme cela l'a été souligné dans de nombreux travaux, les modèles agents développés en sciences sociales sont rarement validés suivant les critères classiques (Amblard et al., 2006). Le modèle utilisé a été calibré à certains niveaux géographiques et utilisé dans un but d'expérimentation à d'autres niveaux géographiques. Il s'agit de discuter de la pertinence d'une telle démarche (dans un contexte de modélisation multi-échelle), de l'apport de connaissances qu'elle permet, de la nature des limites qui lui sont associées.

Le monde artificiel utilisé ici pour l'expérimentation est un système de villes. Il s'agira d'abord d'appréhender en quoi il s'agit d'un système complexe et de présenter les objectifs du modèle EuroSim (1). Les principes du modèle, avec notamment la définition « d'agents-villes » et la formalisation du fonctionnement des marchés d'échanges qui constituent le moteur des changements, sont brièvement exposés (2). Les sorties du modèle sont analysées à partir d'un certain nombre de villes-types qui illustrent la diversité des « réponses » des villes à des modifications dans la perméabilité des frontières entre blocs géographiques (3). La dernière partie ouvre la discussion sur l'imbrication des phases de validation et d'expérimentation dans un modèle agent développé dans un contexte multi-échelle (4).

1 Les systèmes de villes comme systèmes complexes ; expérimenter sur l'évolution des villes

Les villes évoluent à des rythmes variés dans le temps et dans l'espace. Certaines, très attractives, croissent et s'élèvent dans la hiérarchie urbaine (régionale, nationale ou internationale), alors que d'autres stagnent ou même déclinent, notamment en termes relatifs. Plusieurs facteurs interdépendants sont sous-jacents à de telles différences : le plus intuitif correspond aux caractéristiques propres de la ville, sa taille (avec les économies d'agglomération sous-jacentes), son profil économique (et donc ses capacités d'innovation), ses ressources en termes d'environnement, de richesse, de gouvernance. Une approche en termes d'analyse spatiale privilégiera en revanche la forme et l'intensité des interactions entre les villes, leurs positions relatives les unes par rapport aux autres. Ces deux facteurs sont évidemment liés : la forme des interactions engendre des différentiels entre les caractéristiques des villes, et ces différentiels induisent à leur tour des interactions d'intensités différentes. Ces relations sont en général non linéaires et elles produisent au niveau macro-géographique des structures urbaines (organisation hiérarchique, configuration spatiale) qui tendent à s'auto-reproduire.

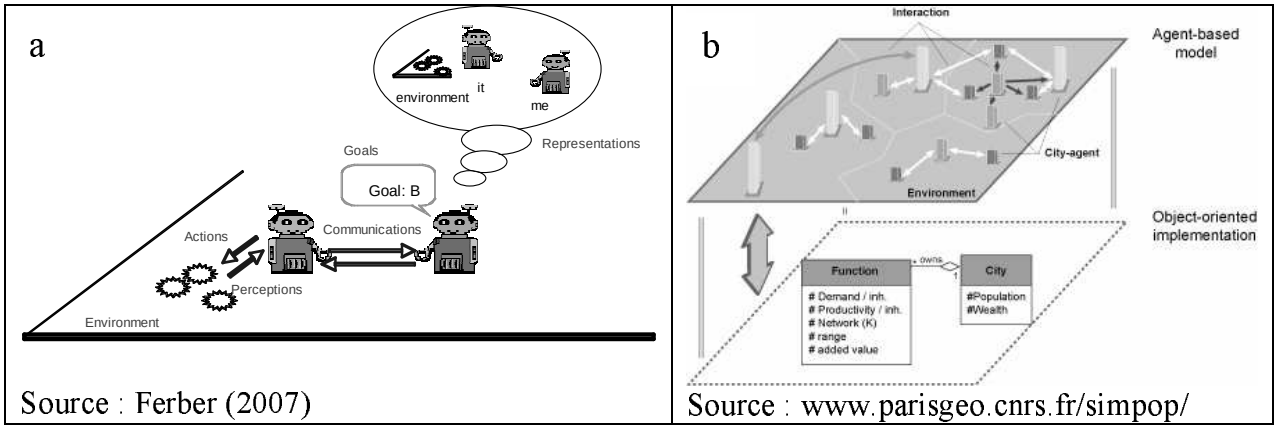
L'objectif a été de développer un modèle qui permette de simuler l'évolution des villes en fonction du jeu d'interactions opérant entre elles, et d'explorer

les liens entre interactions, structure urbaine et dynamique des villes. Les modèles classiques d'interaction spatiale reposent sur les principes gravitaires permettant d'exprimer le résultat de l'effet dissuasif de la distance sur les échanges entre lieux (qu'il s'agisse de quartiers, de villes, de régions). Si la distance (et/ou la contiguïté) continue de jouer un rôle fondamentalement structurant sur les échanges d'un certain nombre de biens et de services de niveau régional, cela n'est plus le cas pour nombre de services spécialisés de haut niveau qui opèrent suivant des logiques de réseaux indépendants de la proximité géographique. Ces logiques relèvent de complémentarités entre spécialisations, d'effets de contexte, et de phénomènes que l'on peut qualifier de contingents à ce niveau d'observation et de modélisation. La simulation multi-agents a été un outil efficace pour formaliser ce type d'interactions et le combiner avec des logiques classiques de proximité géographique.

Le modèle devait permettre :
- de reproduire les évolutions observées au niveau macro-géographique : population urbaine totale, population urbaine par blocs géographiques, configuration spatiale du système urbain, forme de la hiérarchie urbaine ;
- d'explorer le fonctionnement des réseaux d'échanges des villes d'un point de vue théorique;
- d'expérimenter quels effets auraient l'existence de contraintes politiques en matière d'échanges sur le fonctionnement de ces réseaux et sur les différenciations inter-urbaines. L'effet d'une barrière entre les blocs des pays de l'Europe de l'Est (ex pays socialistes) et de l'Ouest a été analysé en particulier. La réduction des possibilités d'échange influe-t-elle de la même façon sur toutes les villes ? Y a-t-il des profils de villes qui souffrent plus que d'autres de l'existence de barrières dans la construction de leurs réseaux d'échange ?

2 Un modèle multi-agents pour expérimenter : le modèle EuroSim

Les systèmes multi-agents (SMA) ont été développés en s'appuyant sur des métaphores sociales et anthropomorphiques et assez naturellement la plupart des applications en sciences sociales utilisent les agents pour formaliser des êtres sociaux, des individus autonomes ayant une représentation de leur environnement et étant capable d'interagir avec les autres agents et d'agir sur l'environnement (figure 1a). Le questionnement portant sur la dynamique d'un système de villes, notre choix a été de formaliser les villes par des agents.



Source : Ferber (2007)

Source : www.parisgeo.cnrs.fr/simpop/

Figure 1: Des agents sociaux aux agents villes

2.1 Des agents-villes

Les villes elles-mêmes sont des systèmes complexes, et Berry (Berry 1964) appelait déjà de ses vœux, en 1964, des simulateurs urbains qui permettent d'en étudier la complexité dans un article intitulé « Cities as systems within system of cities ». L'objectif d'EuroSim étant d'approcher les logiques interurbaines, l'hypothèse est qu'il n'est pas nécessaire de formaliser explicitement le fonctionnement des différentes composantes de la ville et de leurs interrelations. L'ensemble des villes européennes est donc conceptualisé comme un système dont les entités élémentaires sont les villes, chacune d'entre elles étant formalisée par un agent (figure 1b). Les agents-villes ne représentent pas des acteurs individuels (comme les maires par exemple), ni des moyennes, et ils ne sont pas non plus des agents représentatifs au sens classique. En effet la ville ne correspond pas à un niveau de décision que l'on souhaite formaliser en tant que tel. Les agents d'EuroSim sont des entités abstraites dont les comportements peuvent être interprétés comme la résultante d'une variété de comportements relatifs à des niveaux différents. L'hypothèse est en revanche que la ville est considérée comme une entité collective indivisible et non pas comme un simple support. L'autonomie de l'agent informatique dans la gestion de ses interactions constitue un atout pour formaliser les interactions interurbaines et traduire les phénomènes d'auto-organisation qui opèrent dans ce processus. Deux types d'agents-villes sont définis :

- des agents simples, réactifs, pour représenter les 5000 villes avec plus de 10 000 habitants ;
- des agents plus complexes, cognitifs, pour les villes grandes et/ou spécialisées qui sont environ au nombre de 200 en 1950 et de 400 en 2050 (valeur estimée).

2.2 Le fonctionnement du modèle

Le modèle a été construit de façon à être *compatible* avec différentes théories relevant de l'urbain (places centrales de Christaller, économies d'agglomérations, base économique, cycles d'innovations, « path

dependency »), cependant ce modèle ne s'apparente pas directement à une et une seule de ces théories (Pumain et al., 2008).
La situation initiale correspond à la situation observée des villes européennes dans leur état de 1950. A cette date les systèmes urbains nationaux sont déjà solidement inscrits dans l'espace et ils définissent le « contexte » dans lequel les villes vont évoluer. L'hypothèse est que ce contexte joue un rôle fondamental dans la dynamique des villes. Comme l'illustre la figure 2, le réseau urbain local de Bruxelles induit d'autres potentiels d'interactions de proximité que celui de Madrid. Par ailleurs, avec le développement des technologies de transport, ces potentiels évoluent alors que la position géographique des villes est restée la même.

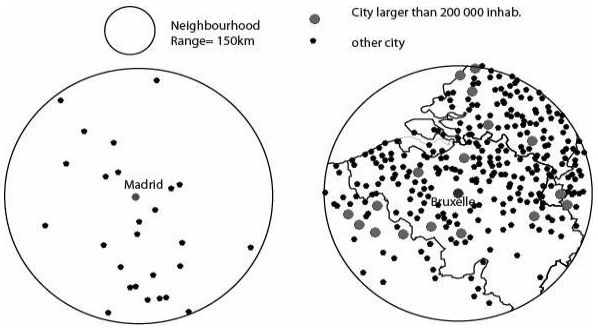


Figure 2 : Exemple de différents contextes urbains locaux : Madrid et Bruxelles en 1950

La possibilité offerte par les SMA de communication entre les agents a joué un rôle majeur dans la formalisation du modèle. La figure 3 décrit les principales étapes d'une itération du modèle. Sans entrer dans les détails[1] on retiendra les points nécessaires à la discussion :
- à chaque période de temps (pas de temps = année) chaque ville constitue, pour chacune de ses spécialisations, un réseau dans le cadre duquel s'effectuera ses échanges.
- les échanges commerciaux sont l'aboutissement d'une série d'échanges de messages entre les agents-villes. Les villes ont deux rôles, celui de producteur

[1] EuroSim est une implémentation d'un modèle générique SIMPOP2 réalisé dans le cadre d'une collaboration entre géographes et informaticiens : A. Bretagnolle, J-M Favaro, B. Glisse, T. Louail, H. Mathian, D. Pumain, L. Sanders, C. Vacchiani. Ce modèle générique a donné lieu à plusieurs applications référant à des contextes spatio-temporels variés.
(voir www.parisgeo.cnrs.fr/simpop/).
L'environnement dans lequel le modèle a été développé est la plateforme SWARM. La partie simulateur à proprement parler a été développée en Objective-C. Le temps est simulé selon un ordonnancement mixte: synchrone pour définir une unité globale d'avancement (changements d'états des agents) et asynchrone pour gérer les interactions entre agents (échanges d'information puis échanges économiques). Les échanges économiques sont eux-mêmes gérés en 2 temps (offre puis demande) et permettent de donner du sens à la compétition entre agents et d'assurer que l'ordre de traitement n'est pas lié à l'ordre d'activation.

et celui de consommateur et les messages sont envoyés dans l'ordre suivant : chaque ville productrice envoie à l'ensemble des agents-villes formant son réseau une information sur la quantité de biens ou de services produits. Les villes consommatrices répondent sur leurs besoins. Tous les envois ayant lieu simultanément, les villes demandeuses reçoivent plusieurs propositions, et effectuent ensuite des choix en fonction de différents critères (liés par exemple à la richesse des villes offreuses). Suivent des transactions et transferts de richesses. La procédure est réitérée jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de consommateur pour une offre proposée ou d'offre pour les demandes restantes.

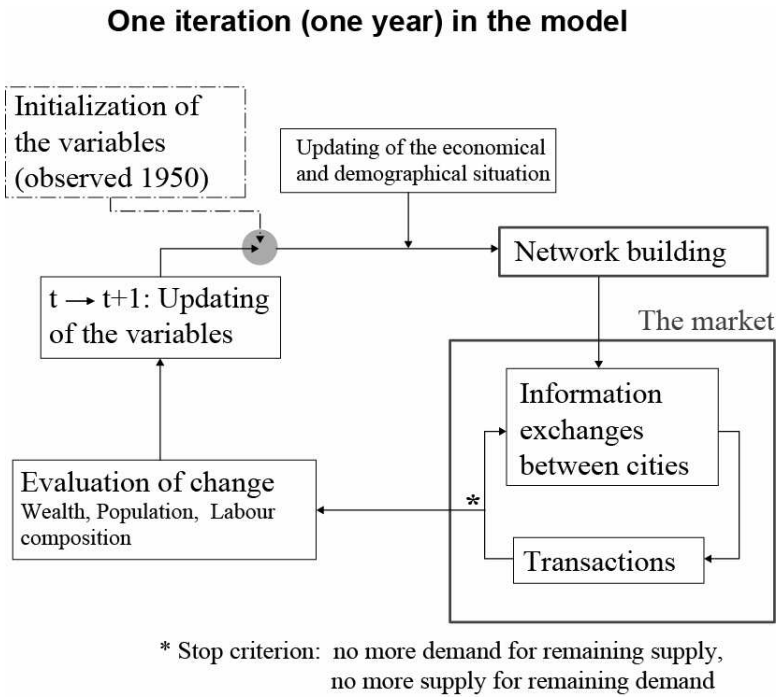


Figure 3: Principales étapes d'un cycle du modèle EuroSim

- la constitution des réseaux d'échanges est une étape essentielle : elle se fait en trois temps : 1- *constitution du réseau potentiel* (suivant les spécialisations, logique de proximité spatiale, de complémentarité fonctionnelle…) ; 2- *constitution du réseau d'échange d'information* : une sélection est faite parmi les villes précédentes, suivant une double logique : d'une part maintien dans le réseau des meilleures villes-clientes des étapes précédentes, et d'autre part renouvellement partiel du réseau. La sélection se fait suivant un tirage aléatoire, jusqu'à ce que la somme des demandes des villes sélectionnées dépasse $\boldsymbol{k}$ fois l'offre de la ville productrice, $\boldsymbol{k}$ étant un paramètre du modèle. La taille des réseaux n'est ainsi pas fixée a priori, $\boldsymbol{k}$ correspondant plutôt à un critère d'arrêt ; 3- Le *réseau des transactions effectives* : la figure 4, centrée sur une ville simultanément pourvoyeuse de certains biens (point de vue de l'offre) et demandeuse d'autres biens, illustre l'enchevêtrement des échanges d'informations et de biens. De la superposition de ces échanges simultanés

résulte une compétition entre les villes. Ainsi seule une partie des échanges d'information se concrétisent par une transaction et un transfert de richesse.
- A chaque fin de période un bilan économique des échanges est fait. La croissance de chaque ville dépend de ce bilan. La population totale et la structure de la population active évoluent en fonction de la capacité de la ville à exploiter les potentialités de son réseau d'échanges et à s'enrichir par la vente des productions associées à ses différentes spécialisations. Concrètement, s'il reste des invendus, la population active du secteur associé sera diminuée, et au contraire elle sera augmentée s'il existe une demande qui n'a pu être satisfaite dans le cadre du marché d'échanges.

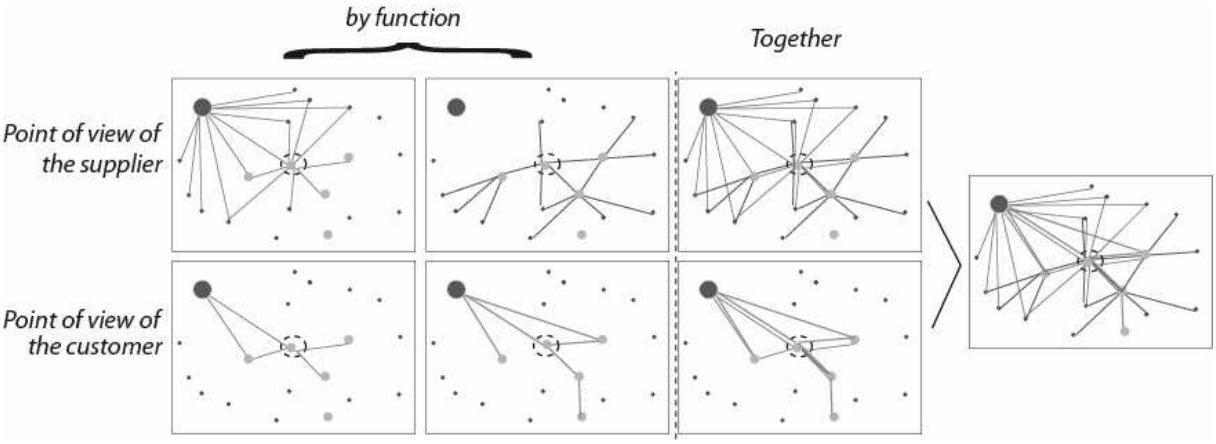


Figure 4 : Les deux « rôles » des agents villes, superposition de réseaux et compétition entre les villes

2.3 Mise en œuvre et validation du modèle dans un contexte multi-échelle

Le modèle est composé de règles relativement simples, d'un petit nombre de paramètres, et sa complexité réside principalement dans l'interférence des échanges opérant en parallèle dans un grand nombre de réseaux (en tant que productrice une ville est insérée dans autant de réseaux qu'elle a de spécialisations, ces réseaux se renouvelant partiellement à chaque pas de temps).
La démarche de validation a consisté en plusieurs étapes, comprenant vérification de la cohérence interne, analyse de sensibilité, et calibrage, à partir de 90 simulations. La variable « cible » du calibrage est la population tant en termes de quantité (capacité du modèle à reproduire la population urbaine totale jusqu'en 1990 ainsi que des bons ordres de grandeur pour les plus grandes villes du système) qu'en termes de structures (capacité du modèle à reproduire une hiérarchie rang-taille stable conforme à ce que l'on observe pour la plupart des systèmes urbains sur une période de un siècle). On a ainsi défini un jeu de paramètres produisant des trajectoires *plausibles* même si elles diffèrent, pour un certain nombre de villes, de ce que l'on a pu observer entre 1950 et 2000. Pour reprendre une formulation de B. Walliser

(2007), « on s'intéresse plus à la possibilité d'un phénomène qu'à sa réalisation effective ».

3 Expérimentation : diversité des "réponses" des villes relativement à différents scénarios

Le modèle théorique ainsi élaboré et calibré est ensuite utilisé comme laboratoire d'expérimentation pour explorer les implications relatives de scénarios comme par exemple l'effet de l'ouverture (scénario F1) / fermeture (scénario F0) des échanges entre blocs géographiques, ou d'hypothèses différentes sur la démographie européenne[2]. Lors de cette étape on s'est intéressé à des indicateurs correspondant à d'autres niveaux d'observation que ceux envisagés lors du calibrage, en particulier la taille des réseaux, la configuration des flux, l'évolution de la répartition de la population active etc. On présente ici quelques résultats sur la diversité des réponses des villes à partir d'une part de la population des villes (variable cible) et d'autre part des échanges (moteur de la dynamique).

Les résultats montrent que certaines villes résistent mieux que d'autres à l'existence de contraintes sur les échanges : tel est le cas par exemple de villes possédant plusieurs spécialisations. Ainsi les trajectoires des populations de Londres et Budapest sont strictement identiques qu'il y ait ou non un effet barrière alors que des villes plus mono-spécialisées comme Glasgow et Manchester sont plus sensibles aux contraintes opérant sur leurs échanges (figure 5).

De plus, la présence ou l'absence d'une barrière entre Est et Ouest peut avoir des effets différents d'une ville à l'autre : l'absence de barrières peut en effet étendre (résultat correspondant à l'intuition) *OU* diminuer (contre intuitif) l'importance des réseaux d'échanges entre les villes. Glasgow et Budapest illustrent cette diversité de réponses. Ainsi Glasgow peut étendre son réseau d'échanges liés à sa spécialisation industrielle dans un contexte d'ouverture (figure 6a), alors qu'ils se réduisent dans un contexte de frontières fermées, entraînant un frein à sa dynamique de croissance (figure 5c). Inversement Budapest souffre de la concurrence associée à cette absence de barrière pour sa spécialisation *technopole* (figure 6b). Elle perd progressivement ses villes clientes et le réseau associé à cette spécialisation va même quasiment disparaître (figure 7). Néanmoins, étant donnée la diversité de ses spécialisations, et notamment son rôle de centre régional et national, la

[2] Scénarios construits à partir de deux hypothèses extrêmes de IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis : www.iiasa.ac.at) sur les dynamiques démographiques européennes à l'horizon 2050. La construction de ces scénarios est détaillée dans le rapport TIGRESS : http://www.tigress.ac/reports/final/eurosim.pdf.

trajectoire démographique de la ville n'est pas affectée (figure 5d). La possibilité de transférer les actifs du secteur dont la performance est en baisse à d'autres activités est la raison de cette résilience. Aucune règle introduite dans le modèle ne pouvait faire attendre *a priori* cette différence de comportement entre Budapest et Glasgow, elle résulte du jeu des interactions entre les sous-ensembles de villes. Et cette différence qui émerge des interactions croisées des villes au sein de leurs réseaux respectifs est en accord avec la théorie urbaine.

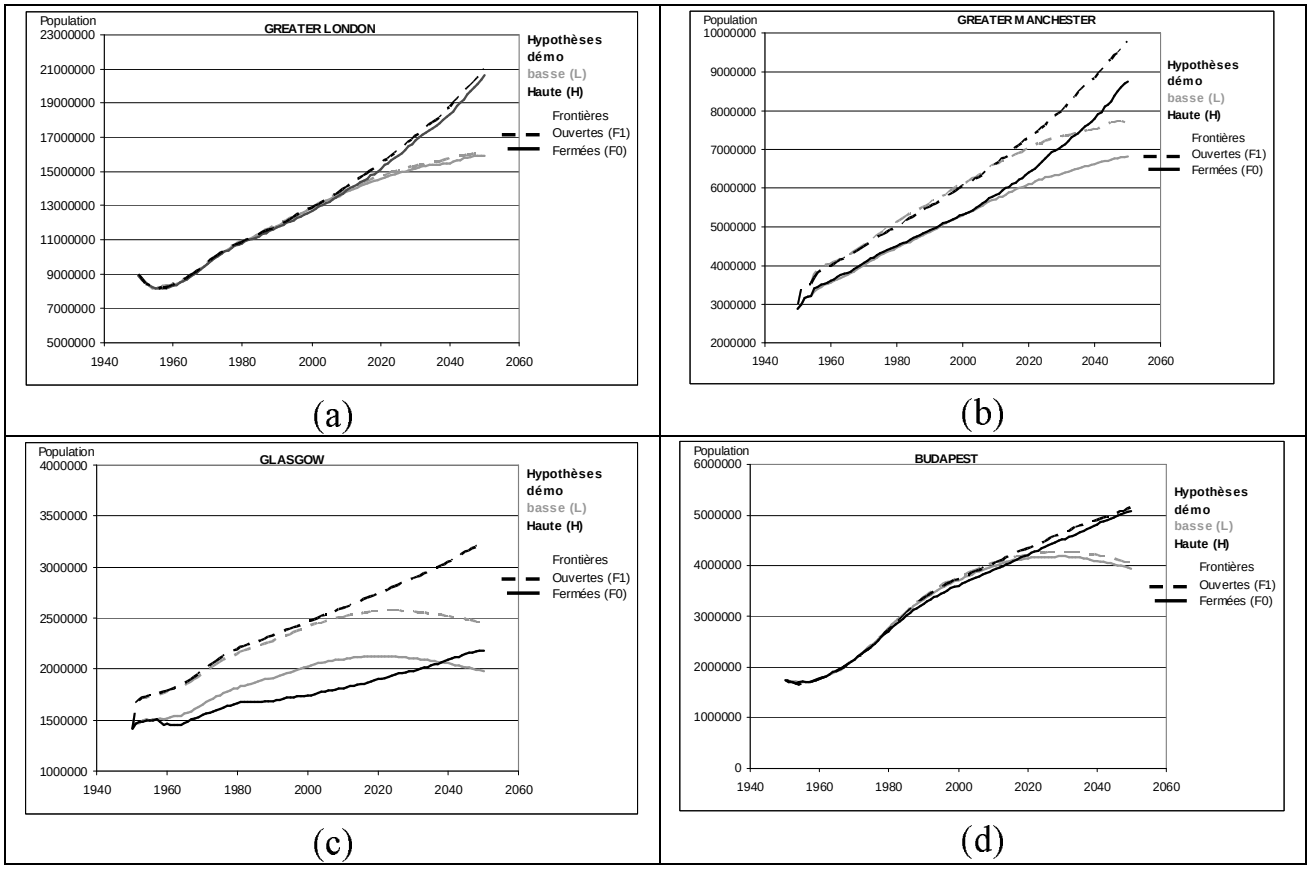
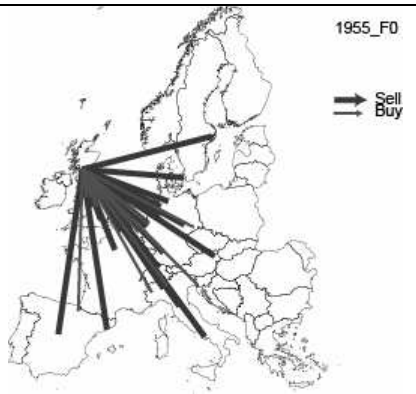
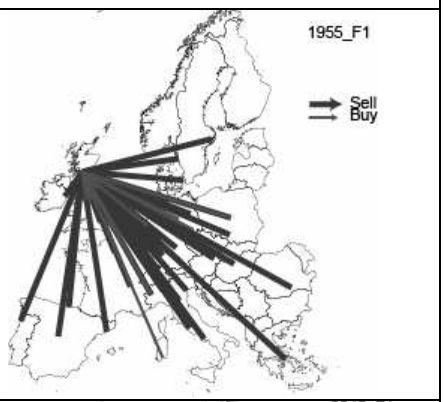
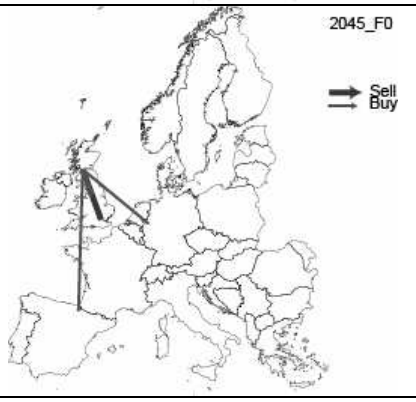
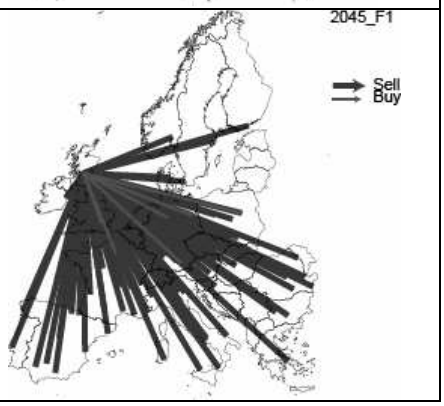
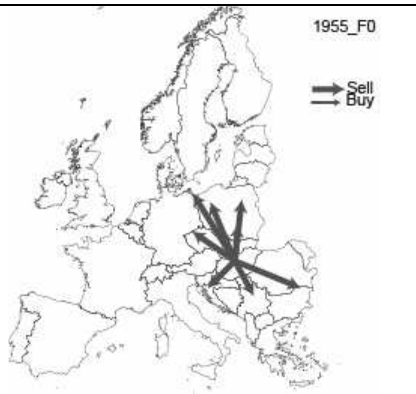
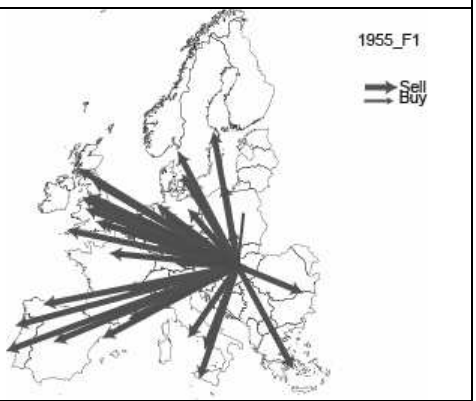
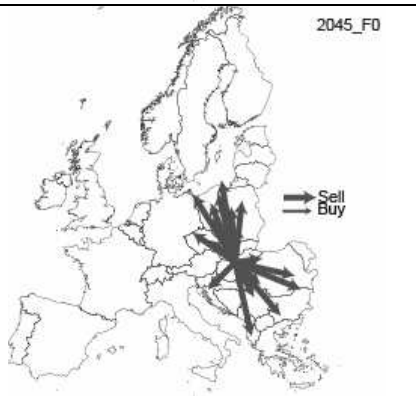
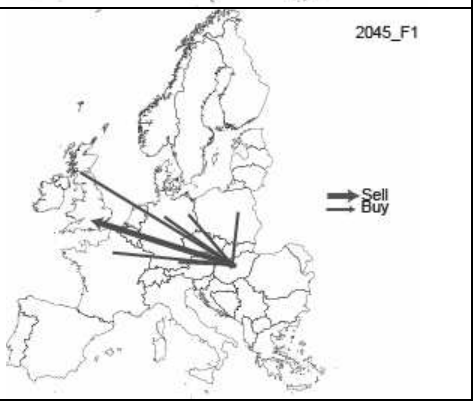


Figure 5 : Evolution de la taille de quatre villes entre 1950 et 2050 pour quatre scénarios (croisant la présence (F1) ou non (F0) d'une barrière entre Est et Ouest avec deux hypothèses démographiques, haute (H) ou basse (L))

Industry 2	F0 : barriers East/West	F1 : no barriers
1955		
2045		

(a) Glasgow

Technopole	F0 : barriers East/West	F1 : no barriers
1955		
2045		

(b) Budapest

Figure 6 : Représentation des réseaux de transactions associés à la spécialisation *Technopole* de Glasgow et Budapest dans les scénarios avec (F0) et sans (F1) barrières entre Est et Ouest, à deux dates, 1955 et 2045.

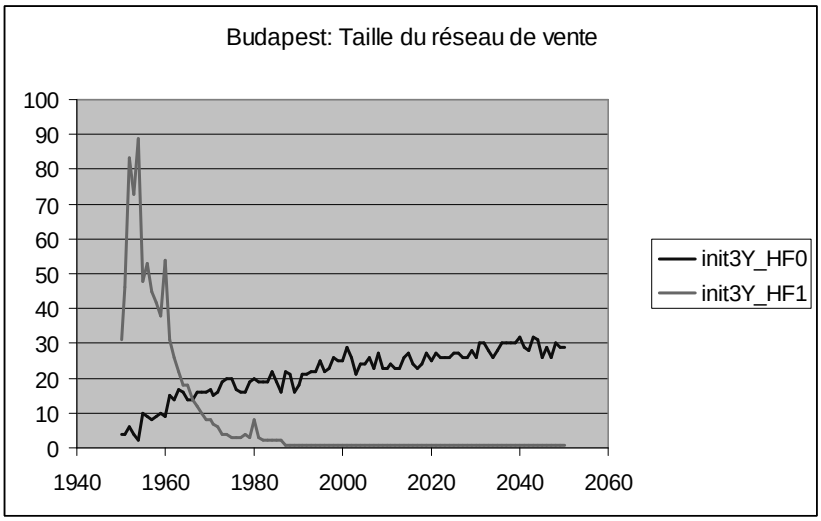


Figure 7 : Evolution de la taille des réseaux d'échange associés à la spécialisation *Technopole* pour Budapest, avec (HF0) et sans (HF1) barrières entre Est et Ouest

4 Discussion sur la validation d'un tel modèle : entre calibration et expérimentation

Un point de discussion concerne la validation d'un modèle ayant pour ambition d'expliquer un phénomène observé. On peut distinguer différents types de démarches dans les pratiques scientifiques, les plus classiques étant :
- la validation théorique, consistant à étudier les propriétés mathématiques du modèle d'un fait généralement stylisé, approche souvent utilisée par les économistes, assez rarement en géographie.
- la validation statistique, propre aux modèles empiriques. On procède dans un premier temps au calibrage des paramètres du modèle sur un jeu de données observées, et dans un deuxième temps on vérifie la capacité du modèle à reproduire le phénomène dans un autre contexte.
- la validation par expérimentation, souvent utilisée pour des phénomènes physiques. On construit une maquette afin d'étudier l'effet d'un phénomène dans un contexte simplifié et contrôlé (par exemple une soufflerie pour étudier l'effet du vent en fonction de la morphologie du bâti).

Les méthodes associées sont variées, dépendant à la fois de la thématique et du support de formalisation, et engagent plusieurs niveaux de vérification (conceptuelle, fonctionnelle, analyses de sensibilité… les typologies répertoriant ces méthodes sont nombreuses). Dans le cadre des modèles de simulation numérique, il faut ajouter les étapes de validation informatique (dépistage des bugs, cohérence numérique). Dans le domaine des SMA ces dernières sont sans doute insuffisamment menées lors des applications.

Dans le cas du modèle EuroSim on modélise un fait empirique dont certains aspects sont appréhendés sous la forme de *faits stylisés* (système d'échanges économiques par exemple), et d'autres à partir de mesures empiriques précises (nombre d'habitants de chaque ville, organisation rang-taille de l'ensemble des villes par exemple). La posture adoptée a été de conduire une validation pouvant être partielle de certains points de vue, mais croisant plusieurs angles d'attaque et tenant compte de ces deux niveaux d'observation (fait stylisé et mesure). D'un côté les analyses de sensibilité ont été effectuées sur plusieurs types d'input : conditions initiales, évènements exogènes, variables conjoncturelles, paramètres. De l'autre on a vérifié en parallèle : - la *cohérence* relativement aux *connaissances* accumulées dans le domaine ; - la capacité du modèle à produire des évolutions *plausibles* ; - l'*adéquation* avec les évolutions observées pour certains *niveaux géographiques*.

Classiquement les phases de vérification, de validation et d'expérimentation se succèdent et en théorie elles devraient être indépendantes les unes des autres. Pour le modèle EuroSim ces phases ont été étroitement imbriquées et ont impliqué des aller-retours dans cette chaîne. Par exemple, l'introduction d'une nouvelle spécialisation pour un sous-ensemble de villes peut constituer un test de sensibilité à une perturbation exogène ou représenter une expérience servant à explorer les effets d'une innovation sur l'évolution du système de villes.

Finalement l'articulation étroite entre les phases d'analyse de sensibilité et d'expérimentation et la stabilité des résultats associés se sont révélées des éléments clés pour évaluer la cohérence du modèle. Il s'agit d'une méthode moins systématique mais plus intégrative et plus conforme aux pratiques des méthodes SMA qu'une approche classique. Il nous semble indispensable de développer des approches plus formelles dans cette direction afin de combiner rigueur scientifique et souplesse de formalisation offerte par les SMA, particulièrement utile pour la modélisation en sciences humaines et sociales.

5 Références

[1] Amblard F., Phan D. (eds), Modélisation et simulation multi-agents: applications pour les sciences de l'Homme et de la Société, Hermes-Lavoisier (2006)

[2] B. Berry, *Cities as systems within systems of cities, aux Auteurs de Rochebrune*, Papers of the Reginal Science Association, (1964).

[3] J. Ferber, Multi-agent concepts and methodologies, in Phan, Amblard (eds), Agent-based modeling and simulation in the social and human sciences, The Bardwell Press, Oxford (2007)

[4] B. Glisse, Exploration scientifique par la conception collaborative de systèmes multi-agents, Thèse, Lip6, Paris.

[5] D. Pumain, L. Sanders, A. Bretagnolle, B. Glisse, H. Mathian, C. Vacchiani-Marchuso, The *future of urban systems: exploratory models* in Lane, van der Leeuw, West, Pumain (eds), *Complexity perspectives on innovation and social change*, Springer, Methodos series (2008 à paraître).

[6] Sawyer R A, 1979, "Understanding urban models versus understanding cities" *Environment and Planning A* **11**(8) 853 – 862

[5] B. Walliser, in Pumain, Thisse, Walliser, *Débat: Nouvelle économie géographique et géographie: quel dialogue*, l'Espace Géographique, 3, p193-214, (2007)

Nous remercions les deux referees pour leur lecture minutieuse et les pistes de réflexion qu'ils nous ont suggérées pour la suite du travail.