



HAL
open science

Interaction d'ontologies informatique et géographique pour simuler des dynamiques multi-scalaires

Thomas Louail, Denise Pumain

► **To cite this version:**

Thomas Louail, Denise Pumain. Interaction d'ontologies informatique et géographique pour simuler des dynamiques multi-scalaires. Ontologies et modélisation par SMA en SHS (dir. Denis Phan), Hermès Science, 2014, Traité RTA, série Informatique et Systèmes d'Information. hal-03820224

HAL Id: hal-03820224

<https://hal.science/hal-03820224v1>

Submitted on 18 Oct 2022

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.

Interaction d'ontologies
informatique et géographique
pour simuler des dynamiques multi-scalaires

Thomas LOUAIL
Laboratoire Informatique, Biologie Intégrative et Systèmes Complexes (IBISC)
Université d'Evry-Val d'Essonne

Denise PUMAIN
Laboratoire Géographie-cités
Université Paris 1

Ce texte a été rédigé en 2009-2010 puis repris en 2013 pour être publié sous forme de chapitre dans un ouvrage collectif intitulé « Ontologies et modélisation par systèmes multi-agents en sciences humaines et sociales » (2014), ouvrage dirigé par Denis Phan et publié aux éditions Hermès / Lavoisier. Les affiliations des auteur-e sont celles qui étaient les leurs en 2009-2010.

1. Introduction : théorie géographique et modèle informatique, en boucle

Les villes forment des systèmes complexes, évolutifs et hiérarchiques [PUM 06a]. L'évolution de leur organisation géographique peut sembler immédiatement traduisible en un modèle informatique dont les agents et les règles seraient le simple reflet des entités et des processus associés à chaque niveau, tels que conceptualisés en géographie. En étendant la formule initiale de Brian Berry [BER 64] « *cities as systems within systems of cities* », l'auto-organisation urbaine peut être observée à trois ou quatre échelons, celui des individus, du quartier, de la ville — comme entité spatiale et socio-économique évolutive — et du système des villes, constitué par les interactions entre les villes. Cette représentation implique des choix « ontologiques », qui supposent de savoir expliciter par le modèle informatique la conception établie en géographie de ce que sont les niveaux ainsi que les relations entre ces niveaux. L'intérêt d'une modélisation est alors de conduire à préciser des hypothèses sur les variables, processus et paramètres-clés qui expliquent ces interdépendances, notamment la manière dont les entités villes participent à la formation des propriétés du niveau « système des villes » et comment elles sont en retour canalisées dans leur évolution interne, morphologique notamment, par leur appartenance au système. Le modèle peut aussi permettre de préciser des hypothèses sur les effets éventuels de l'organisation interne des villes, sur leur « efficacité spatiale » et sur leur attractivité au sein du système des villes.

On qualifie de la sorte deux asymétries. La première part de la théorie urbaine, élaborée à partir d'analyses comparatives des villes et des systèmes de villes, avec des outils très divers, dont certains emploient déjà les concepts des systèmes complexes [PUM 06b]. C'est bien de l'intérieur de la théorie urbaine qu'une première validation des choix nécessaires à la représentation informatique du modèle est opérée. La manière de définir les entités géographiques, la sélection des attributs et des relations qui vont être choisis pour constituer les agents et règles du programme, sont effectuées sous le contrôle du chercheur en sciences sociales. Le passage au modèle n'est cependant pas totalement neutre, il oblige à se donner une représentation qui explicite et formate la description.

La seconde asymétrie réside dans les sorties calculées par le programme, qui en principe constituent la « surprise » apportée par le modèle [BAT 01], la signature de la complexité, cette « émergence » de configurations macroscopiques ou de propriétés nouvelles que le théoricien des villes n'aurait pas pu prévoir *a priori* en détail, compte tenu du nombre et de la diversité des interactions qui se jouent dans le déroulement du calcul. Là encore, cependant, on voit bien que cette émergence a été guidée par les hypothèses du chercheur, par la sélection des entités et des

relations qu'il a opérée, et par sa connaissance préalable de ce qu'il est en droit d'attendre d'une approche par la simulation informatique.

Dans cet article nous montrons comment la résolution des problèmes posés par l'articulation de niveaux d'organisation dans un modèle dynamique peut passer par la construction négociée et formalisée d'une ontologie thématique multi-niveaux infléchie, qui peut alors être implantée dans un modèle (section 2.1). Nous expliquons ce qui distingue selon nous les modèles multi-niveaux, et en quoi une approche à base d'agents peut suggérer des solutions aux problèmes informatiques soulevés par la conception de ces modèles (section 2.2). Nous nous focalisons ensuite sur un cas précis de réalisation. Nous étudions en particulier deux aspects importants dans le couplage de niveaux opéré : la représentation de l'espace à chacune des échelles géographiques simulées (section 3), et la formalisation des interactions inter-niveaux : hybridation conceptuelle de la notion de fonction urbaine en géographie et sa factorisation en informatique (section 4).

2. La question de l'articulation des niveaux

Avec le modèle *Simpop3* nous souhaitons intégrer deux niveaux de la dynamique urbaine : celui du système des villes, modélisé par *Simpop2*, est construit par les processus de différenciation hiérarchique et fonctionnelle de villes dans un territoire, sous l'effet de leurs interactions spatiales, tandis que *simpopNano* simule la croissance et la différenciation des quartiers d'une ville, lesquels accueillent les activités et les populations nouvelles qui représentent le résultat de ses interactions avec les autres villes. L'objectif est alors de caractériser quels peuvent être les effets de morphologies urbaines différentes sur ces dynamiques intra et interurbaines. Cette démarche comparative est mise en oeuvre pour analyser l'évolution des formes urbaines en Europe et aux Etats-Unis au cours des deux derniers siècles [LOU 10].

2.1. Le point de vue de la géographie

Les choix ontologiques qui président à la construction d'un modèle urbain multi-niveaux sont d'abord déterminés par l'une des finalités assignées à cette modélisation, qui est de faire avancer la théorie urbaine en géographie grâce à une représentation de quelques principes majeurs permettant des expérimentations qui les mettent à l'épreuve d'ensembles d'observations et d'hypothèses ou de scénarios divers. Le modèle est donc conçu pour permettre à la fois une utilisation dans des contextes variés (l'Europe et les Etats-Unis donc, mais aussi l'Afrique du Sud, la

Russie, l'Inde et la Chine¹) et un retour vers les données (dans le cadre d'une démarche de validation multiscalaire).

La définition d'une ontologie, lors de la conception du modèle *Simpop2* simulant la structuration et l'évolution des systèmes de villes dans une grande région du monde, s'est effectuée sous une double contrainte : celle de la modélisation, réductionniste et généralisante, et celle de l'axiologie disciplinaire de la géographie, qui est de comprendre le monde dans sa diversité selon les localisations. Ces deux ambitions contradictoires ne peuvent être satisfaites simultanément. Nous avons choisi de les suivre chacune aux deux niveaux de notre modélisation multi-scalaire des systèmes urbains. Le système des villes a d'abord été modélisé de façon générique, puis spécifié pour deux applications, à l'Europe et à l'Amérique du Nord [BRE 09, BRE 10], tandis qu'au niveau de la ville, nous construisons un modèle générique local pour lequel nous testons les effets de réseaux de transport différents, représentatifs de situations typiques et idéalisées, de l'Europe d'une part et des Etats-Unis d'autre part.

Pour produire un modèle générique de l'évolution des systèmes de villes permettant une approche comparative, il est nécessaire de prévoir sa portabilité dans des pays ou des continents différents, et donc de ne retenir comme agents et comme règles du modèle que des entités et des processus qui soient communs à tous les systèmes. Cela explique que les différences sélectionnées pour spécifier l'hétérogénéité des agents soient d'ordre démographique et économique, et excluent d'autres considérations, politiques, sociales ou culturelles, impliquant des processus qui ne sont pas comparables au même degré d'un système à l'autre. C'est ainsi que les principaux attributs qui définissent et différencient les agents « villes » sont leur population, leur richesse, et leur(s) fonction(s) économique(s). Ces attributs ont aussi été choisis car ce sont eux qui entrent dans la construction des deux composantes majeures de l'émergence de tous les systèmes de villes :

- la différenciation hiérarchique (les inégalités de la taille des villes, en termes de poids démographique ou économique) ;
- la différenciation fonctionnelle, qui représente l'orientation du profil d'activité des villes.

Géographes et économistes identifient des « spécialisations » urbaines à partir des « portefeuilles d'activités » des villes, ou de leur « avantage comparatif ». Ce concept d'origine économique inclut plus largement pour les géographes une « situation géographique ». La situation inclut, en plus de la taille et de la spécialisation économique, des facteurs de position dans divers réseaux permettant

¹ Implémentations en cours dans le cadre du programme de l'ERC GeoDiverCity (<http://geodivercity.parisgeo.cnrs.fr/>).

d'évaluer le potentiel évolutif d'une ville relativement à celui des autres villes avec lesquelles elle se trouve en interaction à une époque donnée.

Même sous cette forme générique, qui ne retient de la description des villes que ce qui peut permettre la comparaison d'un système à l'autre, le modèle répond donc bien à une intention de géographe, en ce sens que les relations qui sont explicitées permettent de représenter les principaux traits distinctifs des villes à l'intérieur d'un même territoire. Les relations sélectionnées ont une expression utile à la description et l'explication de la différenciation interne d'un système de villes, on retrouve donc l'objectif disciplinaire de compréhension de la diversité géographique à cette échelle.

Le modèle générique représente l'évolution du système des villes produite par les interactions entre les villes. Une opération de généralisation est nécessaire lors de l'explicitation des relations entre les villes, et donc des relations entre ces deux niveaux de la ville et du système des villes. En effet, une simulation « réaliste » devrait modéliser un nombre beaucoup trop élevé d'interactions entre les villes : échanges de biens, migrations de personnes, investissements, passages d'information, cette liste non exhaustive des interactions possibles et effectives n'est pas représentable dans les conditions actuelles d'une modélisation informatique. Sauf à envisager la possibilité d'actualiser la « carte de l'empire » (en tout point semblable à l'empire, selon la fiction de J.L. Borges), ce qui non seulement supposerait une capacité de stockage et de calcul infinie des ordinateurs, mais aussi l'aptitude démiurgique du modélisateur à collecter tous les faits matériels et immatériels susceptibles d'intervenir dans les dynamiques urbaines : on voit donc bien que les interactions qui sont représentées dans le modèle sont issues d'un travail préalable de sélection d'entités et d'indicateurs. Plus précisément, il s'agit de « faits stylisés », incluant aussi des relations entre entités et attributs, et qui sont sélectionnés pour bien caractériser chaque niveau d'après leur capacité à affecter les dynamiques que l'on cherche à simuler.

Nous avons émis l'idée que les interactions qu'il est possible de simuler sont de « second ordre » [PUM 06c] : même si elles sont traduites en réseaux de flux d'échange, la source de ceux-ci provient des spécialisations urbaines les plus marquantes, et les interactions qui sont modélisées représentent seulement l'effet asymétrique des inégalités de profils d'activité et de situation géographique des villes. Ce sont ces asymétries d'interaction qui font évoluer progressivement les rangs hiérarchiques des villes dans le marché d'échange, et qui à plus long terme influencent leur capacité à adopter les vagues d'innovation successives, sous forme d'investissement dans de nouvelles fonctions urbaines.

2.2. Un point de vue informatique

Une approche calculatoire purement « ascendante », où l'on chercherait à faire émerger, à l'exécution, tous les objets géographiques caractéristiques des niveaux d'organisation supérieurs (quartier, ville, système de villes) à partir de la seule spécification de la dynamique d'un niveau élémentaire (celui des individus), rendrait extrêmement difficile la reconstruction de configurations réalistes sur les propriétés d'intérêt de notre démarche comparative de systèmes urbains. Un modèle « complet », entièrement spécifié à ce niveau élémentaire d'organisation, est bien sûr hors d'atteinte : soit parce que théoriquement on ne sait pas décrire certains processus au niveau élémentaire choisi ; soit parce que les données nécessaires sont inaccessibles ou trop coûteuses à acquérir. Surtout, sur la période de plusieurs siècles abordée par le modèle, l'aléa historique, la planification, les institutions collectives, jouent un rôle structurant crucial qui doit être explicitement pris en compte.

Inversement avec une approche uniquement « descendante » (*top-down*), l'agrégation scalaire exclut du modèle des données fondamentales permettant d'individualiser les entités, spatialement, économiquement, et de préserver la complexité du système modélisé. Intuitivement, on sent que dès lors que l'on considère son évolution sur une durée allant de quelques années à quelques siècles, un système aussi complexe qu'une ville met en jeu à la fois des causalités ascendantes et descendantes qu'il est donc nécessaire d'articuler dans un modèle qui chercherait à formaliser cette évolution. L'enjeu informatique est alors de se donner les moyens d'intégrer au sein d'un même modèle des processus associés à plusieurs niveaux d'organisation spatiale.

Nous appelons modèle spatialisé multi-niveaux un modèle comportant dans sa spécification des entités informatiques (objets, agents, processus) représentant des entités du domaine modélisé situées à des niveaux d'organisation spatiale distincts, et interagissant à travers des processus transversaux que l'on qualifiera d'interniveaux. Cette définition implique que nous distinguons les modèles multiniveaux des modèles entités-centrés plus « classiques »², où seul un niveau d'organisation spatiale est spécifié dans les règles du modèle [LI 12]. Bien qu'il soit possible d'étudier le comportement dynamique de ces modèles à au moins deux niveaux (le niveau micro des entités constituantes, auquel le modèle est décrit, et le niveau macro, où se forment les motifs (*patterns*) lors de l'exécution, mais aussi à une multitude de niveaux méso intermédiaires), les niveaux méso et macro sont des niveaux d'observation. On peut les caractériser dynamiquement par

² Qu'ils soient des automates cellulaires, des modèles à base d'agents, des modèles de microsimulation, etc.

des mesures sur la population d'entités simulées, détecter l'apparition de formes, rechercher des comportements rares, etc. Mais ces événements surviennent à l'exécution, ils ne sont pas spécifiés dans le modèle. En résumé, on ne peut rien dire sur ces niveaux d'organisation méso et macro avant de faire tourner la simulation, raison pour laquelle ces modèles individus-centrés classiques se révèlent très limitants et inadaptés dès qu'il s'agit d'aborder des questions intrinsèquement multi-niveaux et relatives à des dynamiques de longue durée [GIL 10].

Pour représenter et calculer des systèmes dynamiques discrets, l'informatique met à disposition de nombreux formalismes. En choisir un entraîne souvent une mise en balance entre la puissance expressive de l'approche choisie et la simplicité de sa mise en œuvre. Les systèmes multi-agents (SMA) et la programmation orientée objets (POO) sont des techniques informatiques qui permettent une représentation fine et directe des objets et des processus géographiques. Par rapport à d'autres méthodes informatiques, également dédiées à la spécification et au calcul de systèmes dynamiques³, les SMA représentent un bon compromis pour simuler des systèmes humains et sociaux. L'inspiration sociale à l'origine du vocabulaire des SMA ainsi que la malléabilité de leurs concepts fondamentaux (agent, interaction, organisation) en font actuellement une approche privilégiée en simulation sociale. Le modèle opérationnel à base d'agents est alors le prolongement presque « naturel » du modèle conceptuel élaboré de façon interdisciplinaire [MEU 04]. De plus, les travaux sur les SMA ont donné lieu à la proposition de métamodèles organisationnels [GUT 98] dont il a été montré la fécondité pour aborder des questions complexes de modélisation sociale [ABR 04].

Il faut cependant garder en mémoire que cette « souplesse » a des contreparties. Les SMA ne sont pas *stricto sensu* un formalisme de calcul⁴, tout en offrant une riche grille de lecture systémique et décentralisée propice à la conception de modèles dans un cadre pluridisciplinaire. De ce fait, le seul objet calculable et déterministe de la chaîne d'élaboration collective du modèle est souvent le programme final, ce qui pose d'importants problèmes de vérification et d'évaluation par les experts. De plus, une représentation analytique des modèles à base d'agents est très souvent hors d'atteinte, et il n'y a alors pas d'autre approche possible que la simulation pour étudier le modèle. Ainsi, par rapport à des approches plus parcimonieuses (mais aussi souvent plus « rugueuses »), on peut considérer qu'une approche calculatoire à base d'agents offre typiquement une plus grande finesse de description, mais induit aussi un glissement de la difficulté

³ Réseaux de Petri, systèmes de réécriture, méthodes formelles, etc.

⁴ Il n'existe pas de définition universelle et non ambiguë de ce que sont un agent et un SMA, au contraire d'un automate cellulaire par exemple.

de la spécification du modèle à l'analyse de son expression dynamique. Le modèle construit permettra de reproduire une palette plus étendue de comportements du système étudié, mais sa dynamique sera bien moins intelligible et il sera de fait moins contrôlable. Ces derniers points posent déjà d'importantes questions de validation des modèles construits, celles-ci étant depuis plusieurs années au cœur des réflexions de la communauté modélisatrice en SHS [AMB 06]. Ces réserves apportées, il n'en demeure pas moins que l'approche à base d'agents s'est révélée féconde pour concevoir des modèles de simulation multi-niveaux, comme l'ont illustré certains auteurs à travers une analyse comparative des formes prises par le multi-niveaux dans les modèles [GIL 10].

3. L'exemple de la représentation de l'espace géographique

3.1. Réseaux et territoires

Un premier exemple des interactions entre les deux processus ontologiques concerne les représentations de l'espace géographique, qui comporte toujours des effets territoriaux et des effets réticulaires, parmi lesquels une sélection doit être effectuée : au niveau du système des villes, l'espace est représenté de façon réticulaire, par les échanges entre les villes qui évoluent en fonction de leurs concurrences en termes de potentiel d'innovation ; au niveau de l'espace intérieur des villes, la représentation est cellulaire, la ville étant subdivisée en quartiers, dont les surfaces continues sont investies par les activités nouvelles que les innovations ont créées. Mais l'articulation dans le modèle de ces espaces, réticulaire et surfacique, implique des hypothèses sur les effets possibles de l'organisation des réseaux internes à la ville sur la dynamique évolutive de celle-ci dans le réseau des villes, que le modèle va permettre de tester au moyen de simulations menées parallèlement sur deux idéaux types de formes de villes, européennes et américaines.

3.2. Calculs spatialisés à différentes échelles géographiques

Simpop3 est le résultat d'un couplage entre un modèle de simulation de système de villes, *Simpop2*, et d'un modèle de simulation de croissance d'une ville, *SimpopNano* [LOU 09, LOU 10]. A l'échelle interurbaine, les réseaux d'échange des villes sont représentés par des graphes dans le modèle *Simpop2*, où chaque ville constitue un sommet du graphe. Pour *SimpopNano*, simuler une ville en évolution spatio-temporelle impose de choisir une représentation de l'espace cohérente et pertinente pour l'ensemble de la période de deux siècles abordée par le modèle. Dans la lignée des avancées des systèmes d'information géographique

(SIG) et des logiciels de cartographie 3D, la tendance est à la représentation la plus réaliste possible des espaces géographiques dans les modèles. Ces outils permettent une représentation géométrique très précise des objets géographiques et des réseaux de transport. Ils sont de plus en plus utilisés couplés à des modèles de simulation, et facilitent le raisonnement et la prospective sur des terrains réels, de même qu'ils améliorent la communication en offrant des visualisations réalistes qui facilitent le retour des experts sur le modèle et la prise de décision. Ainsi, nous pensions *a priori* que simuler l'évolution spatio-temporelle du réseau de quartiers du modèle *SimpopNano* nécessiterait une représentation surfacique, qui intégrerait la représentation de la géométrie associée à chaque quartier. Cependant, trois raisons nous ont incités à préférer une représentation de l'espace intra-urbain au moyen d'un graphe, plutôt que de travailler avec des données vectorielles issues de SIG :

- nous ne cherchons pas à simuler l'évolution au cours du temps de la forme géométrique de la ville et de ses quartiers, mais l'évolution de la répartition interne des activités au sein d'une ville dont la géométrie est de type européen ou américain ;
- l'échelle temporelle considérée (deux siècles) rend arbitraire la définition de processus décrivant l'évolution de la forme géométrique des quartiers ;
- nous travaillons sur des formes idéales types de villes, qui ont du sens dans notre comparaison de « classes » de villes, entre Europe et Etats-Unis.

Surtout, la conception interdisciplinaire a permis de déterminer qu'au niveau intra-urbain la variable spatiale clé permettant de différencier les quartiers était leur accessibilité à l'intérieur des réseaux de transport de la ville. En conséquence, une représentation réticulaire de l'espace intra-urbain nous a semblé plus adaptée. Un graphe permet la simplification des relations topologiques (surfaiques) entre les quartiers par des relations scalaires. Dans notre cas, nous avons associé à chaque quartier du modèle un indice d'accessibilité, dont la valeur est égale à la moyenne des plus courts chemins de ce quartier à tous les autres quartiers de la ville (indice de Shimbel). Le poids associé à chaque quartier est ainsi proportionnel à une mesure agrégée qui reflète la position du quartier par rapport à tous les autres. Cet indicateur encapsule bien une information de nature spatiale et non scalaire.

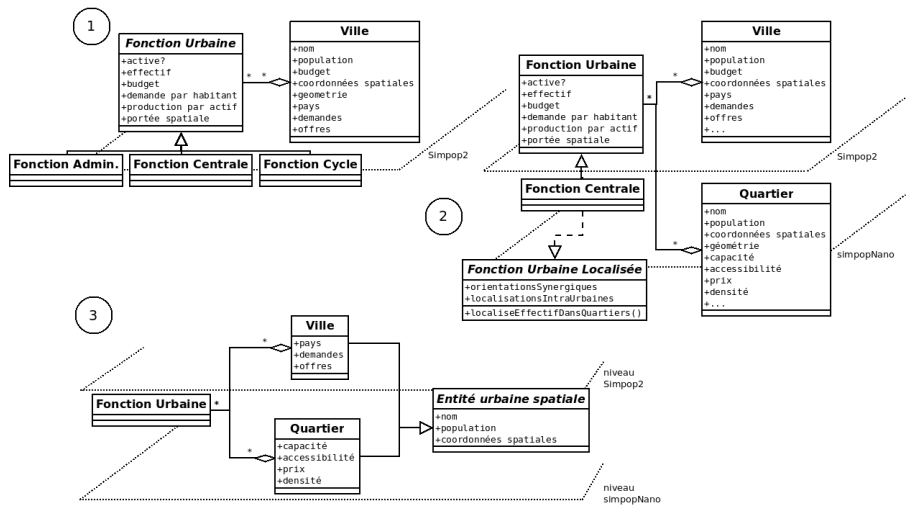


Figure 1. Schéma des différents niveaux d'intervention de l'entité fonction urbaine dans les modèles Simpop2 (1) et SimpopNano (2) et (3)

De façon générale, nous essayons de suivre un principe de parcimonie dans la conception de l'application, qui ici consiste à établir une hiérarchie des concepts manipulés par le thématique pour les implanter dans des structures de données et de contrôles informatiques. Partant d'un programme existant et implémentant le modèle Simpop2 [GLI 07] écrit à l'aide d'un langage de programmation objet et utilisant une librairie dédiée à la simulation orientée agent (Swarm), un des objectifs informatiques est d'essayer de réutiliser un maximum de « choses déjà écrites », classes de Simpop2 déjà programmées, et de voir si elles peuvent être réutilisées et au moins partiellement transposées à un autre niveau d'organisation géographique, en généralisant ou en précisant. Dans notre cas, cela s'est fait en factorisant un ensemble de propriétés communes à des objets géographiques de niveaux d'échelle différents, et en les regroupant dans une entité géographique abstraite qui a pour propriétés toutes celles qu'ont en commun le quartier, la ville et le système des villes. Comme entités collectives, ces espaces sont des réservoirs de population et de richesse, des réceptacles d'un ensemble de fonctions urbaines, et sont toutes définies par leurs coordonnées spatiales, une forme géométrique, un voisinage. Toutes ont également en commun d'avoir un nom et un identifiant unique dans une base de données. La figure 1 schématise la représentation des fonctions urbaines dans les deux modèles. Dans Simpop2 (1): ville et fonction urbaine sont des types de données (classes). Une ville peut posséder plusieurs fonctions urbaines et une fonction peut être présente dans plusieurs villes. Une fonction urbaine est un type abstrait qui se décline en (et est réalisé par) plusieurs

sous-types. Dans *SimpopNano* (2) la conception se fait, dans l'optique d'une articulation, en repartant de l'ontologie de *Simpop2*. On crée un nouveau type de données, les quartiers, et on réutilise les fonctions urbaines en les sous-typant, de façon à les doter de comportements additionnels leur permettant d'exprimer de façon pertinente les dynamiques propres associées à ce niveau d'organisation spatiale. Généralisation (schéma 3) : on crée un ancêtre hiérarchique commun de plus haut niveau d'abstraction aux deux types de données ville et quartier, en vue d'une éventuelle réification d'autres entités spatiales.

On voit qu'une fois toutes ces propriétés factorisées dans un type de données de plus haut niveau d'abstraction (nommé « Entité urbaine spatiale » au point 3 de la figure 1), on peut alors implanter une ville et un quartier dans le modèle comme des raffinements de ce type abstrait.

4. L'exemple du concept de fonction urbaine

Mettre les deux modèles *Simpop2* et *SimpopNano* « côte à côte » et les exécuter simultanément ne suffit pas à constituer un modèle multi-niveaux. Il nous faut également expliciter les liens entre ces modèles et définir des interactions inter-niveaux : comment s'influencent-ils mutuellement ? Notre solution identifie une description commune aux deux niveaux, qui représente à la fois un effet de la dynamique du système des villes sur la ville, et qui exprime une dynamique interne à la ville susceptible d'avoir des effets en retour sur le système. La notion de fonction urbaine a été infléchie pour permettre l'articulation entre les deux niveaux. Ce second exemple de négociation entre les ontologies consiste à identifier un ensemble d'attributs mesurables qui représentent une sortie du niveau système de villes et une entrée du système ville, et inversement. Ces attributs sont ceux d'une entité dynamique commune, qui représente au niveau de la ville un concept abstrait, dont la pertinence se trouve à l'échelle du système des villes et que les géographes appellent « fonction urbaine ». Celle-ci qualifie la situation géographique et socio-économique de la ville dans le système des villes, et elle est produite par les effets cycliques induisant et résultant des décalages dans la coévolution des villes [PUM 06d]. Elle est donc différenciée en plusieurs types d'attributs selon une typologie de cohortes d'activités. L'importance de chaque fonction au sein d'une ville est quantifiée par le nombre des emplois qu'elle occupe et la valeur de sa production. La typologie mise au point pour conceptualiser le système des villes peut-elle aussi servir à qualifier les types d'activité qui sont en interaction à l'intérieur des villes, en concurrence pour l'occupation de l'espace interne des villes, qui lui-même se différencie par des structures de type centre-périphérie en fonction d'une répartition des

accessibilités ? Inversement, la nomenclature des activités ainsi établie permet-elle de comprendre comment l'implantation des activités dans la ville peut en retour affecter la dynamique interurbaine, en infléchissant la trajectoire de la ville dans le système des villes ? Ce sont ces questions qu'il convient de résoudre pour que la structure hiérarchique de l'ontologie informatique conçue ne conduise pas à effacer l'ontologie géographique en transformant ce qui relève de l'émergence en une simple agrégation pour décrire le passage d'un niveau d'échelle à un autre.

4.1. Une hybridation depuis le niveau du système des villes vers celui de la ville

La notion de fonction urbaine émerge dans les géographies anglaise, allemande et française entre les années 1920 et 1930, elle caractérise un point de vue comparatif et collectif sur les villes d'un territoire qui exercent des activités spécialisées et complémentaires. Elle qualifie le rôle spécifique que joue chaque ville pour un territoire donné, et se décline en typologies qualitatives (distinguant notamment les fonctions politiques et administratives, commerciales, industrielles, touristiques, universitaires, défensives), assorties par la suite de mesures de l'importance quantitative des degrés de spécialisation, puis d'analyses multivariées précisant les associations fonctionnelles. Ces analyses ont conduit à une interprétation nouvelle des fonctions urbaines, qui n'est plus statique (assurer un rôle dans un ensemble) mais dynamique et évolutive (la fonction devient la trace d'une spécialisation momentanée associée à un cycle d'innovation).

Cette conceptualisation permet de simplifier la représentation des relations entre les villes dans le modèle *Simpop2*. La liste des fonctions possédées par une ville détermine les modalités de sa relation avec les autres villes, dans le temps relativement court (quelques décennies) des échanges effectués au cours d'un cycle d'innovation. A une autre échelle de temps (par grandes périodes de cinquante ans à un siècle) les villes sont en concurrence pour l'attraction des fonctions liées à l'apparition d'un nouveau cycle.

L'hypothèse non vérifiée mais plausible que nous avons utilisée pour spécifier le modèle *SimpopNano* est que les activités qui s'implantent localement dans une ville se répartissent dans l'espace de la ville selon une logique compatible avec la typologie adoptée pour ces fonctions. Ainsi, dans le modèle les fonctions centrales de niveau supérieur vont chercher à se localiser dans le centre des affaires (localisations les plus coûteuses mais les plus accessibles), celles correspondant aux cycles industriels chercheront à occuper successivement les quartiers les plus accessibles mais devront assumer des coûts fonciers décroissants au cours du temps, tout en cherchant des synergies avec d'autres acteurs industriels. Cette représentation constitue une grande simplification de la dynamique intra-urbaine

des activités, mais c'est l'hypothèse qui permet sans doute le mieux de simuler les effets éventuels en retour de la dynamique intra-urbaine (liée à l'accessibilité et aux coûts urbains) sur la trajectoire qu'une ville peut prendre dans le système des villes. Cette entité fonction urbaine sert de pont entre les deux modèles, et elle est affectée à la fois par les dynamiques intervenant à l'échelle du système de villes ainsi que par celles du niveau ville, à travers les localisations des actifs de ces fonctions dans l'espace intra-urbain, dont le coût et la pertinence vont influencer sur la réussite de la fonction dans la ville, à l'échelle du système de villes.

4.2. Factorisation conceptuelle : la fonction urbaine comme un « agent multi-niveaux »

Les SMA sont souvent implantés à l'aide de langages de programmation par objets [DRO 02]. Le raffinement des types permis par le concept d'héritage de la programmation par objets permet une transcription directe dans le code du raffinement des ontologies. Prenons l'exemple de la représentation dans le programme de l'entité géographique qu'est la fonction urbaine : celle-ci se fait par le biais d'une classe abstraite, représentant une fonction urbaine générique, déclinée en quatre sous-types et autant de classes : fonction Centrale, fonction Cycle, fonction Administrative et fonction Internationale. Au niveau du système de villes et du modèle *Simpop2*, ces types d'objets sont pertinents et suffisants pour représenter la variété des rôles tenus par les villes dans le système et caractériser le profil d'une ville parmi ses paires. Au niveau d'une ville (modèle *SimpopNano*), où l'on cherche, en plus de la localisation des activités économiques, à reproduire celle des résidents dans l'espace intra-urbain, il est nécessaire de raffiner encore le concept original et de créer un nouveau sous-type de fonction urbaine : la fonction Résidentielle. Cette fonction urbaine est pertinente aux deux niveaux de l'échelle spatiale, ville et système de villes, et peut être à ce titre envisagée comme un « agent multi-niveaux ». Formalisée comme un agent en phase de conception, puis déclinée en une famille d'agents au cours de l'affinement de la réflexion, elle est finalement réalisée comme une hiérarchie de classes d'objets dans le programme. Au niveau opérationnel, l'intérêt de cette approche factorisante est l'effort gagné en cas d'ajout d'un nouveau type de fonction au cours de la vie du modèle : le modélisateur n'aura alors besoin d'écrire que le code différenciant la nouvelle fonction de celles déjà existantes.

Le processus de compétition entre entités territoriales pour l'acquisition des fonctions urbaines innovantes est en fait envisagé comme un mécanisme générique d'affectation des fonctions dans un nombre restreint d'entités spatiales, dans lequel l'« élection » des entités acquérant la fonction est le résultat d'un processus de

ventilation d'une quantité globalement contrainte, sur la base de potentiels calculés localement.

A l'échelle intra-urbaine (*SimpopNano*), les quartiers font une offre, définie par un nombre d'emplacements, qui sont caractérisés par l'accessibilité et le potentiel économique du quartier. Ces deux descripteurs sont couplés dans un score qui reflète l'attractivité du quartier pour la fonction urbaine considérée. Celle-ci ventile alors ses actifs parmi les quartiers dans l'ordre décroissant des scores qu'elle leur a attribués, et les localise dans des proportions qui tiennent compte de ces scores.

A l'échelle interurbaine (*Simpop2*), la fonction concernée établit une liste de préférences sur les villes en leur attribuant un score qui tient compte d'indicateurs comme la population de la ville, sa richesse et les fonctions déjà possédées par la ville. Les villes candidates déposent ainsi une offre et la fonction (qui peut être déclinée en un nombre d'instances qui dépend de la date considérée) élit un sous-ensemble de celles-ci à l'intérieur desquelles elle va effectivement s'installer. L'évolution de la fonction à l'intérieur de chacune des villes élues se fait ensuite de façon indépendante.

Le processus d'affectation est ainsi exprimé dans un mécanisme générique unique décrivant l'affectation d'une fonction urbaine à une entité spatiale urbaine. Les aspects spécifiques de chaque affectation sont rendus paramétrables. Le mécanisme du polymorphisme de la POO permet alors un traitement identique et transparent de l'affectation des fonctions aux entités spatiales représentées.

Conclusion

De la même façon qu'une entité holiste n'est pas qu'une simple addition ou agrégation d'individus, la modélisation n'est pas qu'un transfert de catégories qui s'effectuerait dans un sens puis dans l'autre, de la théorie urbaine vers l'informatique dans un premier temps de la construction du modèle, puis de l'informatique vers la théorie urbaine dans le second temps de l'analyse des résultats des simulations. Même dans les cas où les modèles se construiraient sans concertation entre des thématiciens et des informaticiens, le simple fait de jouer le jeu de la transposition de contenus théoriques dans un modèle amène à trouver un compromis entre des représentations qui font sens dans le champ de la discipline thématique et d'autres qui font sens dans le champ de la discipline informatique. Il y a là une autre manifestation de complexité, qui est l'émergence d'un modèle, un produit hybride entre deux sous-ensembles théoriques, l'un conçu pour

l'intelligence d'un fait social et l'autre pour le traitement systématique de l'information.

Remerciements

Nous remercions le Réseau de recherche sur le développement soutenable (GIS R2DS, www.r2ds-ile-de-france.com/) de la Région Ile-de-France qui a contribué au financement de ce travail.

Bibliographie

- [ABR 04] ABRAMI G., Niveaux d'organisation dans la modélisation multi-agents pour la gestion de ressources renouvelables. Application à la mise en œuvre de règles collectives de gestion de l'eau agricole dans la basse-vallée de la Drôme, thèse de doctorat, Ecole nationale du génie rural des eaux et des forêts, 2004.
- [AMB 06] AMBLARD F., ROUCHIER, J. BOMMEL, P., « Evaluation et validation de modèles multi-agents », dans D. Phan, F. Amblard (dir.), *Modélisation et Simulation Multi-agents – Applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Lavoisier, Paris, 2006.
- [BAT 01] BATTY M., TORRENS P., « Modeling complexity: the limits to prediction », *Cybergeo*, 201, 2001.
- [BEN 04] BENENSON I., TORRENS P., *Geosimulation - Automata-based modeling of urban phenomena*, Wiley, Chichester, 2004.
- [BER 64] BERRY B.J.L., « Cities as systems within systems of cities », *Papers of the Regional Science Association*, 13, p. 147-163, 1964.
- [BRE 10] BRETAGNOLLE A., PUMAIN D., « Comparer deux types de systèmes de villes par la modélisation multi-agents (Europe, Etats-Unis) », dans G. Weisbuch et H. Zwirn (dir.), *Qu'appelle-t-on aujourd'hui les sciences de la complexité ?*, p. 271-299, Vuibert, Paris, 2010.
- [BRE 10b] BRETAGNOLLE A., PUMAIN D., « Simulating urban networks through multiscalar space-time dynamics (Europe and United States, 17th -20th centuries) », *Urban Studies*, 47(13), p. 2819-2839, 2010.
- [DRO 02] DROGOU A., VANBERGUE D. ET MEURISSE T., « Multi-Agent Based Simulation: Where are the Agents? », dans J. Sichman, F. Bousquet, P. Davidsson (dir.), *Multi-Agent-Based Simulation (MABS) Third International Workshop*, Revised Papers, Lecture Notes in Computer Science, 2581, Springer, 2002.
- [GIL 10] GIL QUIJANO J., HUTZLER G., LOUAIL T., « Accroche-toi au niveau, j'enlève l'échelle – Eléments d'analyse des aspects multiniveaux dans la simulation à base d'agents », *Revue d'Intelligence Artificielle*, 24(5), p. 625-648, Hermès, Paris, 2010.
- [GLI 07] GLISSE B., Exploration scientifique par la conception collaborative de systèmes multi-agents, thèse de doctorat, Université de Paris VI, 2007.

- [GUT 98] GUTKNECHT O., FERBER J., « Un métamodèle organisationnel pour l'analyse, la conception et l'exécution de systèmes multi-agents », *JFIADSMA '98*, Hermès, Paris, p. 267-280, 1998.
- [LI 12] LI N., ERVIN S., FLAXMAN M., GOODCHILD M.F., STEINITZ C., « Design and application of an ontology for Geodesign », *Revue Internationale de Géomatique*, 22(2), p. 145-168, 2012.
- [LOU 09] LOUAIL T., « De la géométrie des réseaux viaires à l'organisation spatiale intra-urbaine », *Revue Internationale de Géomatique*, 19(4), p. 443-469, 2009.
- [LOU 10] LOUAIL T., Comparer les morphogenèses urbaines en Europe et aux Etats-Unis par la simulation à base d'agents – Approches multi-niveaux et environnements de simulation spatiale, thèse de doctorat, Université d'Evry-Val d'Essonne, 2010.
- [MEU 04] MEURISSE T., Simulation multi-agents : du modèle à l'opérationnalisation, thèse de doctorat, Université de Paris VI, 2004.
- [PUM 06] PUMAIN D., « Systèmes de villes et niveaux d'organisation », dans P. Bourgine, A. Lesne (dir.), *Morphogenèse*, p. 239-263, Belin, Paris, 2006.
- [PUM 06b] PUMAIN D., « Alternative explanations of hierarchical differentiation in urban systems », dans D. Pumain (dir.), *Hierarchy in natural and social sciences*, p. 169-222, Springer, Berlin, 2006.
- [PUM 06c] PUMAIN D., « The Socio-Spatial Dynamics of Systems of Cities and Innovation Processes: a Multi-Level Model », dans S. Albeverio, D. Andrey, P. Giordano, A. Vancheri (dir.), *The Dynamics of Complex Urban Systems – An Interdisciplinary Approach*, p. 373-389, Physica Verlag, Heidelberg, 2006.
- [PUM 06d] PUMAIN D., PAULUS F., VACCHIANI C., LOBO J., « An evolutionary theory for interpreting urban scaling laws », *Cybergeo*, 343, 2006.