

# Un système multi-agent pour la simulation des dynamiques urbaines

J. Perret<sup>a</sup>      F. Curie<sup>a</sup>      J. Gaffuri<sup>b</sup>      A. Ruas<sup>a</sup>  
julien.perret@gmail.com    florence.curie@ign.fr    julien.gaffuri@jrc.ec.europa.eu    anne.ruas@ign.fr

<sup>a</sup>Laboratoire COGIT - Institut Géographique National,  
73 avenue de Paris,  
F-94160, Saint-Mandé

<sup>b</sup>Joint Research Center - SDI Unit,  
Via Enrico Fermi 2749,  
I-21027, Ispra (VA)

## Résumé

*La simulation des évolutions des villes suppose une certaine compréhension et une modélisation des lois qui gouvernent les dynamiques urbaines. L'approche présentée dans ce papier utilise un système multi-agent pour modéliser les propriétés auto-organisatrices des systèmes complexes urbains et vise à fournir un outil permettant d'étudier les évolutions des systèmes modélisés. Le système multi-agent proposé comporte une hiérarchie d'agents topographiques (e.g. les bâtiments, routes, cours d'eau, îlots) qui peuvent être construits, modifiés, fusionnés, découpés, restructurés et détruits au cours du temps. Le comportement de chaque agent est contrôlé par un ensemble de règles d'évolution, de contraintes et d'actions associées.*

**Mots-clés :** système complexe, système urbain, dynamiques urbaines, simulation urbaine, système multi-agent

## Abstract

*Simulating the evolution of cities suggests the ability to understand and model the laws governing urban dynamics. The approach presented in this paper uses a multi-agent system to model the self-organising properties of urban systems and aims at providing a tool to study the evolutions of the modelled system. The proposed multi-agent system is a hierarchy of topographic agents (e.g. buildings, roads, rivers or urban blocks) that are built, modified, merged, split, restructured and destroyed over time. Each agent's behaviour is controlled by a set of evolution rules, constraints and associated actions.*

**Keywords:** complex systems, urban system, urban dynamics, urban simulation, multi-agent systems

## 1 Introduction

### 1.1 Les systèmes urbains comme systèmes complexes

Les systèmes urbains sont des systèmes complexes composés d'un très grand nombre d'éléments appartenant à différentes échelles et ce dans les dimensions géographiques aussi bien que sociales ou économiques [1]. L'ensemble des acteurs participant à l'élaboration des politiques de développement urbain font face à cette complexité tous les jours. Les contraintes sur le développement urbain liées au développement durable et à l'adaptation au changement climatique renforcent le besoin d'une meilleure compréhension des systèmes urbains et de meilleurs outils pour faire de la prospective sur l'évolution de ces systèmes selon différents scénarios. Le développement de la théorie de la complexité [2, 3] a fourni un cadre théorique riche pour de nombreux champs scientifiques, aussi bien traditionnels qu'interdisciplinaires. Parmi ces derniers figurent la simulation informatique appliquée aux sciences sociales [4] et aux systèmes urbains [5], la biologie [6], mais aussi l'animation comportementale [7].

### 1.2 Le projet GeOpenSim

Le projet GeOpenSim vise au développement d'une plate-forme Open Source pour l'analyse et la simulation des dynamiques urbaines à l'aide de bases de données topographiques historiques [8]. Ces dernières sont construites à l'aide de bases de données topographiques récentes ainsi que de photographies aériennes et/ou de cartes historiques. Ces bases de données sont analysées afin d'identifier des règles d'évolution à différents niveaux meso-géographiques (e.g. la ville ou l'îlot), ainsi

que des statistiques sur des objets spécifiques comme les bâtiments. Chaque simulation peut ainsi être paramétrée à l'aide de règles d'évolution provenant de l'analyse automatique des données historiques, mais aussi de règles énoncées par des experts.

Dans la section suivante, notre approche est positionnée par rapport à différentes approches existantes de la simulation urbaine. Dans la section 3, la modélisation des agents, de leurs règles d'évolution, contraintes et actions sont présentées. Deux exemples d'application de règles d'évolution sont présentés et illustrés dans la section 4, précédant la conclusion et les perspectives des travaux présentés dans cet article.

## **2 Simulation des dynamiques urbaines à l'aide d'un système multi-agent**

### **2.1 Des automates cellulaires aux agents vectoriels**

La simulation des dynamiques urbaines est un domaine de recherche très actif. En particulier, les automates cellulaires ont été très utilisés pour la simulation urbaine et ont permis la simulation de nombreux phénomènes complexes tels que la croissance et la ségrégation [9, 10, 11, 12, 13]. Néanmoins, comme le font remarquer de nombreux auteurs, les automates cellulaires supposent une certaine homogénéité de l'espace et du voisinage des cellules de l'automate. Ainsi, plusieurs modèles ont été proposés afin d'intégrer l'influence du réseau urbain et de contraintes spatiales sur l'accessibilité des cellules de tels automates [14]. D'autres auteurs ont par ailleurs proposé d'étendre le formalisme en y intégrant la notion de graphe [15, 16, 17], qui permet de mieux prendre en compte les voisinages des objets géographiques et les irrégularités de la structure urbaine. La contribution de notre approche réside dans l'utilisation d'une structure hiérarchique (allant du bâtiment à l'agglomération) structurée par des réseaux de communication (les routes, les voies ferrées, etc.) et des graphes de voisinage (notamment entre bâtiments et entre les bâtiments et les routes) permettant une certaine autonomie à l'échelle micro (bâtiments, routes, etc.) et des comportements de régulation à différents niveaux meso (îlot, quartier, ville, etc.).

### **2.2 Un système multi-agent hiérarchique**

Le système multi-agent proposé dans cet article est inspiré de travaux précédents sur la généralisation cartographique automatique [18, 19, 20]. Ces modèles de généralisation cartographique utilisent un système multi-agent qui transforme des objets cartographiques afin de produire une carte lisible. Dans de tels systèmes, les agents doivent trouver un compromis entre des contraintes de lisibilité et des contraintes de préservation qui cherchent à conserver la précision globale de la carte. Les contraintes de lisibilité sont fixées grâce à des critères de perception visuelle, l'échelle de la carte produite, ainsi que des connaissances cartographiques. Les contraintes impliquées dans la simulation urbaine sont ainsi très différentes. En effet, dans le contexte des dynamiques urbaines, si les contraintes de lisibilité ne s'appliquent pas, les contraintes de préservation quant à elles peuvent être utilisées pour préserver une certaine organisation à un niveau meso. Par exemple, une contrainte de préservation peut être utilisée pour conserver la structure de l'îlot pendant sa densification et levée lorsque le type objectif de l'îlot est différent de son type initial. Construit à partir d'un modèle existant, le système multi-agent a ainsi été adapté aux besoins de la simulation urbaine et plusieurs fonctionnalités ont été ajoutées, telles que les règles d'évolution et les méthodes de peuplement.

### **2.3 Règles d'évolution et stratégies**

Afin d'affecter des objectifs appropriés aux agents, des règles d'évolutions sont définies, soit par analyse de données historiques, soit par des experts. Ces règles sont en principe similaires aux règles de transition des automates cellulaires et peuvent prendre en compte le voisinage des agents ainsi que leurs différents attributs (pour les îlots : la densité, le type d'îlot, la localisation de l'îlot par rapport à la ville, etc.). Ces règles peuvent par ailleurs changer en fonction de la période à laquelle l'évolution simulée a lieu, permettant ainsi d'implémenter des évolutions spécifiques à une période donnée. Ces évolutions peuvent différer en vitesse (la croissance d'une ville n'est pas un processus régulier) et en nature. Les méthodes de peuplement sont définies afin de modéliser les différentes stratégies que les agents peuvent utiliser pendant leur évolution. De telles méthodes peuvent, par exemple, spécifier la façon dont les îlots se densifient en reproduisant leur structure interne,

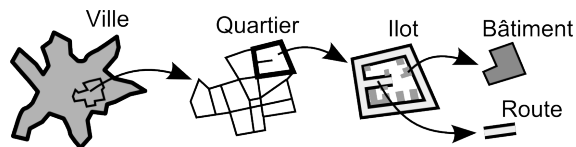


FIG. 1 – Différents niveaux du modèle GeOpenSim : ville, quartier, îlot, route et bâtiment

en se restructurant ou en diversifiant leur structure [21].

### 3 Agents, règles, contraintes et actions

Le but de notre approche n'est pas de produire directement des connaissances spécifiques sur les dynamiques urbaines, mais de développer un modèle de simulation capable tester de telles connaissances pour les évaluer. Ces connaissances sont formalisées sous la forme de règles d'évolution de la ville et de ses composants, et dont les effets sont évalués sur des données géographiques par simulation à base d'agents.

#### 3.1 Des bâtiments aux villes

Le modèle GeOpenSim est un système multi agents hiérarchique comme formalisé par [22]. Différents agents appartenant à des niveaux géographiques imbriqués sont considérés : villes, quartiers, îlots, bâtiments, routes, etc. (cf. figure 1). Les bases de données topographiques ne contenant généralement pas tous ces objets de façon explicite (usuellement, uniquement les objets du niveau micro - bâtiments et routes - sont présents), il est nécessaire de construire les objets manquants nécessaires à la simulation (principalement les objets des niveaux meso - villes, îlots, quartiers). Le modèle GeOpenSim utilise ainsi des méthodes d'analyse spatiale permettant la construction automatique des objets composant les différents niveaux de la hiérarchie urbaine, ainsi que les relations entre ces objets. Les méthodes proposées par [23] sont utilisées pour la construction des objets ville, quartier et îlot à partir des objets bâtiments et routes. D'autres structures telles que les alignements de bâtiments sont également automatiquement construites et utilisées dans la simulation.

Les objets géographiques sont évalués sur des critères morphologiques. C'est l'évolution de ces caractéristiques que l'on cherche à simuler. Par exemple, les caractéristiques suivantes

peuvent être considérées :

- pour un bâtiment, sa surface, son élongation, sa concavité, son orientation, son type (habitation, industriel, etc.),
- pour une route, sa sinuosité, son type (rue, autoroute, etc.),
- pour un îlot, sa densité (quotient de sa surface bâtie et de sa surface totale), sa taille, son type (tissu urbain continu, tissu urbain discontinu, industriel ou commercial, etc.), sa quantité d'espaces vides (espace de relativement grande taille et suffisamment compacts pour pouvoir accueillir de nouveaux bâtiments éventuels), différents indicateurs statistiques sur les bâtiments le composant, etc.,
- pour un quartier, sa surface, le fait qu'il soit périphérique ou non, différents indicateurs statistiques sur les îlots le composant, etc.,
- pour une ville, sa surface totale, sa surface bâtie, la taille de ses réseaux de transport, la distribution de ses bâtiments par type, par taille, par forme, etc.

Les caractéristiques considérées sont calculées automatiquement à l'aide de méthodes d'analyse spatiales plus ou moins complexes. La liste de ces caractéristiques morphologiques n'est pas fermée ; elle peut être étendue en cas de besoin : si un critère morphologique doit être pris en compte pour la simulation d'un tissu urbain particulier, il peut être ajouté.

Le modèle GeOpenSim permet de modéliser l'évolution de ces caractéristiques morphologiques. Pour chaque objet à une date  $t$ , un état cible à une date ultérieure  $t + d_t$  est calculé en utilisant les règles d'évolution de ses caractéristiques morphologiques entre ces deux dates (rappelons que ces règles d'évolution peuvent être soit apprises à partir de l'analyse de données historiques, soit construites ex nihilo). Le modèle GeOpenSim permet de simuler l'évolution de ces objets en les modélisant comme des agents.

#### 3.2 Le cycle de vie d'un agent GeOpenSim

Afin de construire l'état de chaque objet à une date  $t + d_t$  à partir de leur état à la date  $t$  et de règles d'évolution, les objets sont modélisés comme des agents dont le but est de se transformer pour acquérir un état satisfaisant ses règles d'évolution. Pour cela, l'état cible d'un agent à une date  $t + d_t$  est décrit sous forme de contraintes sur ses caractéristiques morphologiques ; les règles d'évolution sont utilisées uniquement pour calculer les valeurs buts de

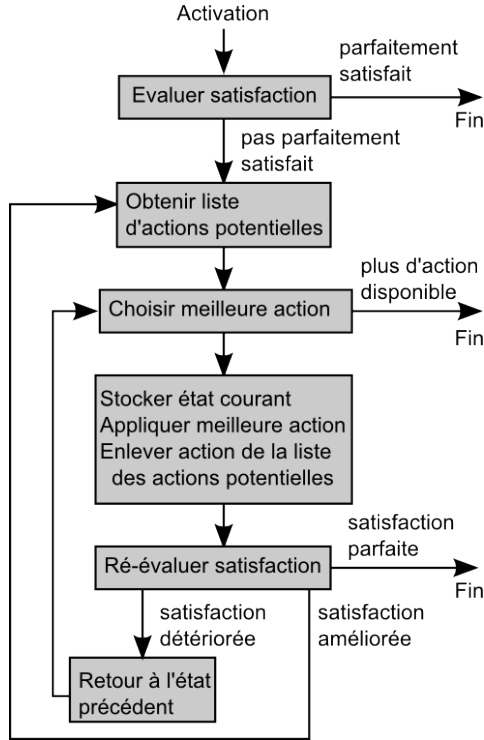


FIG. 2 – Cycle de vie d'un agent.

ces contraintes. Par exemple, un îlot devant respecter une règle d'évolution l'incitant à se densifier de  $X\%$  entre les dates  $t$  et  $t + d_t$  portera une contrainte sur sa densité dont la valeur but sera sa valeur à la date  $t$ , augmentée de  $X\%$ . L'objectif de chaque agent est de satisfaire ses contraintes afin d'acquiescer un état à la date  $t + d_t$  satisfaisant au mieux ses règles d'évolution. Pour cela, chaque agent suit le cycle de vie présenté en figure 2.

Lors de chaque activation, l'agent commence par évaluer son état. Cette étape consiste à calculer l'état de satisfaction de ses contraintes. La satisfaction globale de l'agent est la moyenne des satisfactions de ses contraintes. Si l'état initial de l'agent n'est pas parfait, une liste d'actions pouvant potentiellement améliorer son état est calculée (cf. figure 3). Cette liste est fonction des contraintes insatisfaites de l'agent et de leur degré d'insatisfaction. Chaque action consiste à déclencher un algorithme de transformation géométrique sur l'agent afin de faire évoluer certaines de ses caractéristiques morphologiques. Plusieurs de ces algorithmes d'évolution ont été développés dans le cadre du projet GeOpenSim pour différents types d'agents.

La figure 4 donne des exemples de résultats d'un algorithme de densification d'îlot. Suite

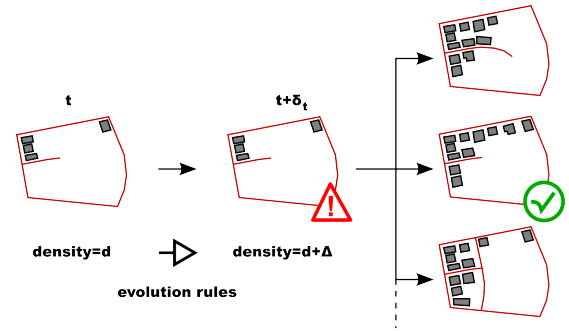


FIG. 3 – Un agent îlot et une règle d'évolution fixant sa densité objectif à  $d + \Delta$  (avec  $d$  sa densité initiale). Afin de satisfaire sa contrainte, l'agent peut essayer différentes actions et choisir celle qui produit la meilleure satisfaction de la contrainte.

à l'application de cette transformation, l'agent ré-évalue son état et, s'il est meilleur que son état précédent, le garde et tente à nouveau de se transformer pour progresser vers un état toujours plus satisfait. Autrement, l'agent retourne dans son état précédent et essaie une autre action de la liste. L'agent essaie ainsi de s'appliquer différentes transformations à la suite pour atteindre un état où ses contraintes sont satisfaites au mieux. Ces essais sont effectués jusqu'à ce que l'agent atteigne un état parfait ou que toutes les actions possibles aient été essayées. Tous les agents (bâtiments, quartiers, villes, etc.) ont le même cycle de vie qui leur permet de satisfaire les contraintes de leur niveau. Les agents meso portent une contrainte particulière, qui les incite à avoir leurs composants dans des états satisfaits. Cette contrainte est satisfaite en utilisant des actions meso, qui consistent à activer leurs agents composants. L'imbrication des agents permet de gérer des interactions entre plusieurs niveaux et simuler par émergence la complexité des dynamiques urbaines.

### 3.3 Interactions, régulation et émergence

Les interactions entre agents du modèle GeOpenSim sont de deux types :

- hiérarchiques, entre agents de niveaux différents (un agent meso et ses agents composants interagissent),
- et transversales entre agents du même niveau hiérarchique (micro-micro ou meso-meso).

Les interactions hiérarchiques sont rendues possibles à travers des actions particulières des agents meso qui consistent à changer les valeurs but des contraintes de leurs agents composants, et à les activer. Ces actions sont utilisées quand

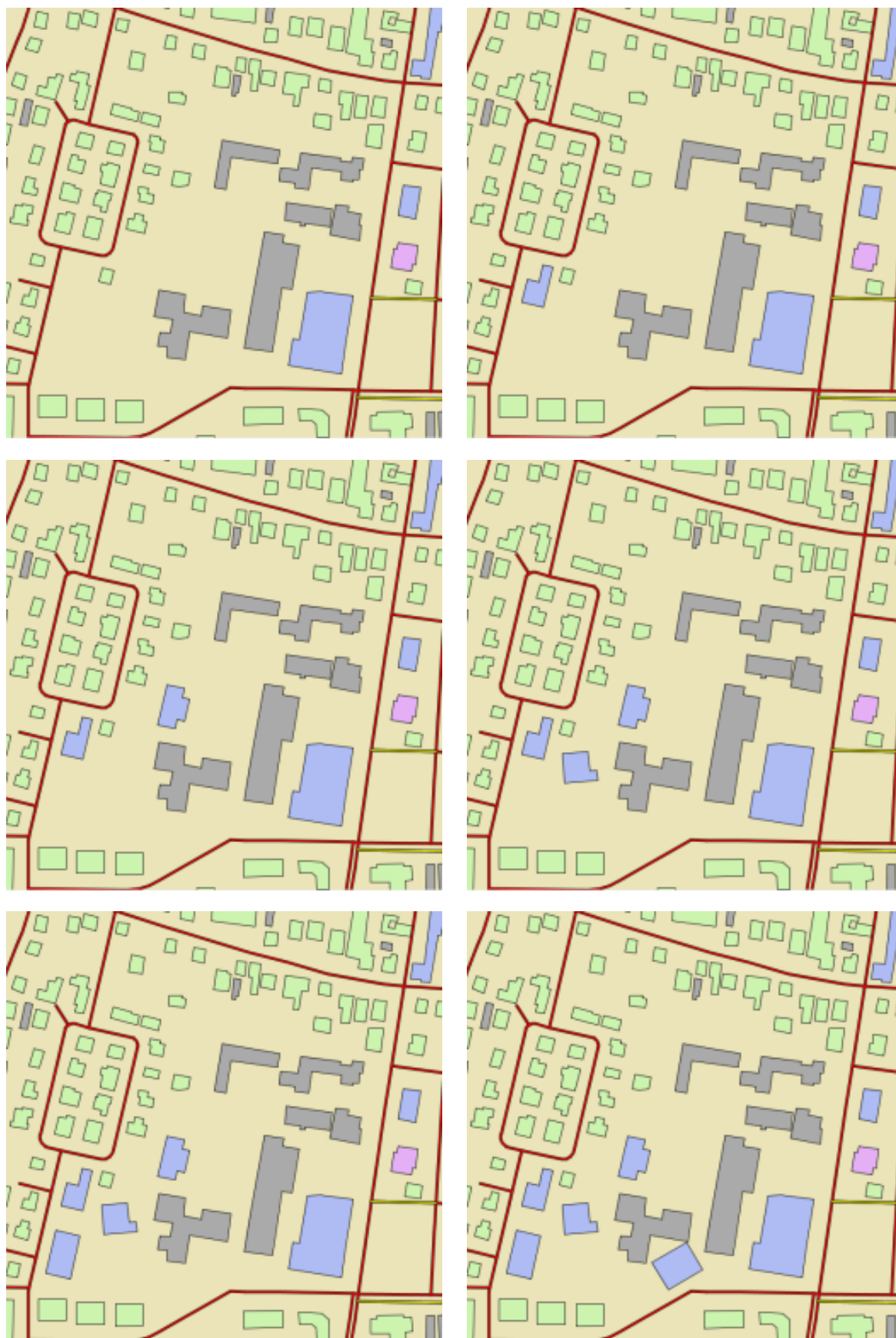


FIG. 4 – Densification d'un îlot.

une contrainte au niveau meso ne peut être satisfaite directement et nécessite d’agir à un niveau inférieur. Par exemple, si une règle d’évolution entre deux dates incite une ville à augmenter sa surface en bâtiments industriels, et une autre à conserver des quartiers homogènes en termes de types de bâtiments (par exemple, des quartier industriels, résidentiels, etc.), ce besoin en bâtiments industriels pourra être transféré au niveau de certains quartiers industriels, en les incitant à se densifier en bâtiments industriels. Si ces quartiers industriels sont déjà trop denses et ne peuvent accueillir de nouveaux bâtiments, une autre action au niveau de la ville consistant à s’étendre en créant un nouveau quartier industriel à un endroit approprié pourra être tentée. Dans cet exemple, un besoin au niveau global de la ville est transféré au niveau local de ses quartiers. À l’inverse, dans d’autres cas, des besoins locaux pourront être résolus en agissant à des niveaux supérieurs. Par exemple, si des contraintes locales d’accessibilité ne peuvent être satisfaites au niveau de plusieurs îlots, des actions globales au niveau des quartiers, voire de la ville toute entière, consistant à restructurer les réseaux de transport pour améliorer la desserte des îlots mal desservis pourront être considérées. Dans cet exemple, un besoin à un niveau local est satisfait en agissant à un niveau supérieur. De cette façon, lorsqu’il existe une différence entre le niveau auquel un besoin qui motive une évolution de la ville entre deux dates et le niveau auquel il est nécessaire d’agir pour répondre à ce besoin, il est possible de transférer ce besoin entre les différents niveaux pour agir à un niveau adéquat.

Les interactions hiérarchiques ne sont pas les seules possibles ; des interactions transversales entre agents du même niveau hiérarchique sont également utilisées pour satisfaire des contraintes locales. Par exemple, lorsqu’un bâtiment est construit dans un îlot devant rester homogène, il va se transformer pour essayer de ressembler à ses voisins. S’il porte une contrainte d’accessibilité, il va chercher à se déplacer près d’une route et, éventuellement, à s’orienter par rapport à elle.

La simulation entre deux dates est déclenchée en activant l’agent de plus haut niveau dans la hiérarchie urbaine (souvent la ville). Cet agent a pour rôle de satisfaire ses contraintes en agissant sur ses composants et en prenant en compte leurs contraintes locales. La simulation se déroule sous la forme d’aller retour entre les différents niveaux. Ces interactions permettent de

simuler par émergence la complexité des dynamiques urbaines.

## 4 Application des règles d’évolution

Les règles d’évolution peuvent être utilisées à différentes échelles pour modéliser différents aspects de l’évolution de l’espace urbain. Dans cette section, deux règles d’évolution simples sont illustrées. Les règles illustrées sont comparables à des règles de transition dans des automates cellulaires, mais le voisinage est ici basé vecteur. La première règle, illustrée par la figure 5, affecte une densité objectif aux îlots. Cet exemple montre une croissance urbaine exagérée où les îlots urbains tendent vers la densité maximum trouvée dans leur voisinage.

Les règles d’évolution peuvent aussi concerner d’autres caractéristiques que la densité, comme le type des îlots. La seconde règle, illustrée par la figure 6, affecte un type aux îlots en fonction de leur type initial et de leur voisinage. La classification des îlots utilisée ici, élaborée par des experts [24], est largement inspirée de la nomenclature de la base de données européenne Corine Land Cover [25]. Dans l’exemple, 4 classes sont considérées : tissu urbain continu, tissu urbain discontinu (en rouge dans la figure), emprise spécialisée bâtie (industrielle ou commerciale, en magenta dans la figure), emprise spécialisée pas ou peu bâtie (industrielle, commerciale voire agricole, en jaune dans la figure).

## 5 Conclusions et perspectives

Dans cet article, un système multi-agent original pour la simulation des dynamiques urbaines est proposé. La dynamique de la simulation du système complexe est contrôlée par des règles d’évolution de haut niveau prenant en compte l’environnement de chaque sous-système. Ces règles sont combinées à une approche basée sur la résolution de contraintes pour atteindre les valeurs objectif fixées par les règles.

L’intention de cet article n’est pas de proposer de nouvelles connaissances géographiques mais de proposer une plate-forme pour implémenter et évaluer des hypothèses sur les dynamiques urbaines. En effet, les règles d’évolution peuvent être utilisées pour différentes simulations dont les résultats sont alors comparés à des données réelles dans le cas de simulations à partir de données du passé. Dans cet article, des



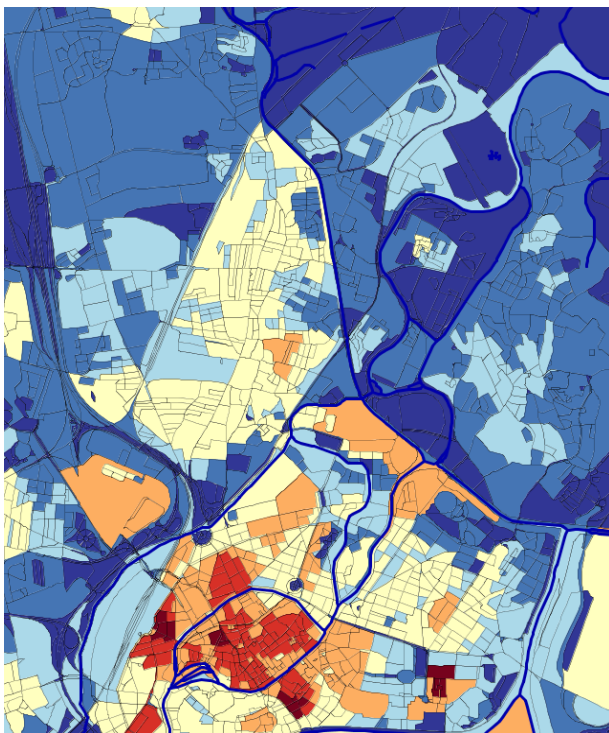
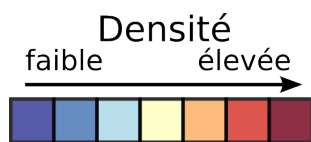
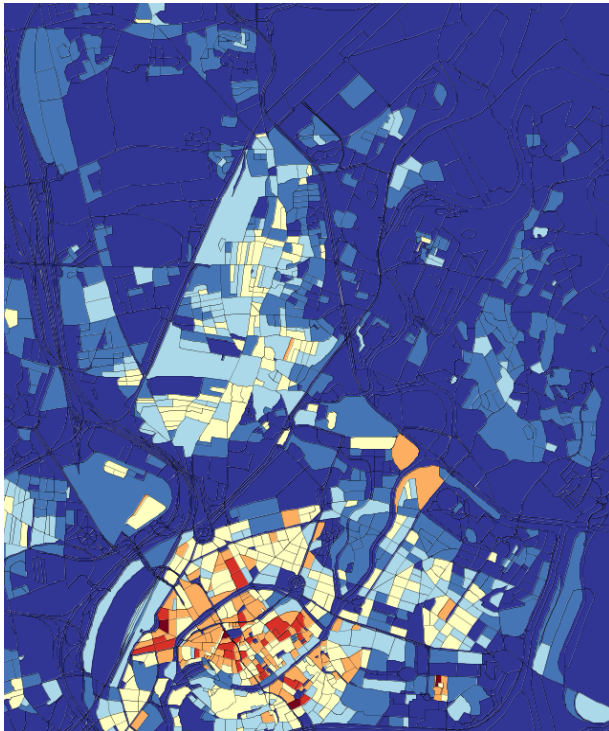
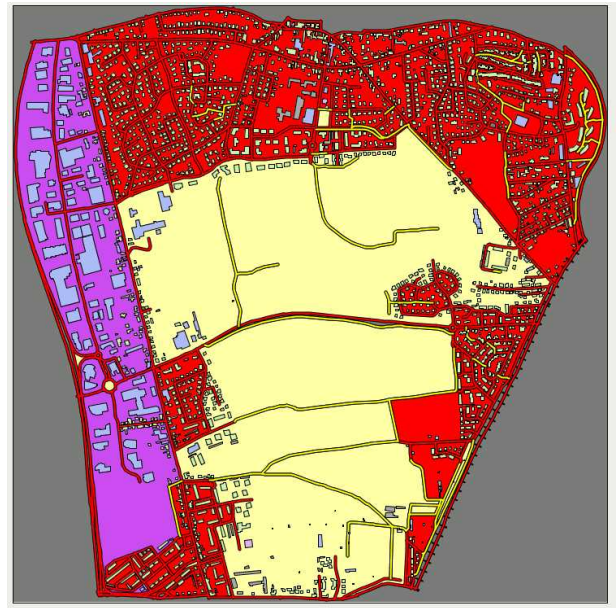


FIG. 5 – Application d’une règle d’évolution simple aux îlots afin de fixer une densité objectif. Comme dans les automates cellulaires, la densité initiale des îlots (à gauche) et leur voisinage sont utilisés pour déterminer la densité objectif (à droite).



#### Type d’îlot

- Tissu urbain discontinu
- Emprise spécialisée bâtie
- Emprise spécialisée pas ou peu bâtie
- Ignoré ici

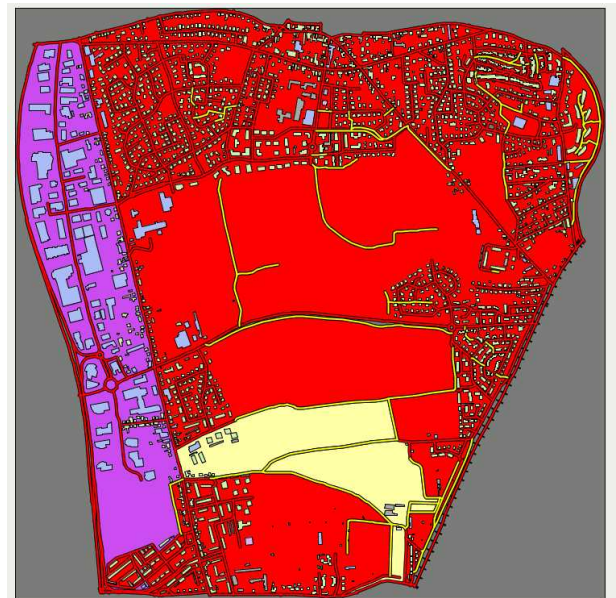


FIG. 6 – Application d’une règle d’évolution simple aux îlots afin de fixer un type d’occupation du sol objectif. Comme dans les automates cellulaires, le type initial des îlots (à gauche) et leur voisinage sont utilisés pour déterminer le type objectif (à droite).

règles d'évolution simples ont été utilisées pour illustrer les possibilités du système, néanmoins des règles complexes peuvent être définies par des experts ou analysées à partir de données historiques. Un effort important est donné afin de fournir aux experts suffisamment de liberté dans la spécifications des règles tout en étant capable d'apprendre de nouvelles règles automatiquement et de pouvoir les calibrer sur des données réelles. Des travaux futurs fourniront de nouvelles contraintes, de nouvelles méthodes d'analyse spatiale mais aussi de nouvelles méthodes de peuplement (notamment concernant les routes).

La plate-forme GeOpenSim propose ainsi un modèle permettant de travailler sur les dynamiques urbaines à différentes échelles de la route et du bâtiment jusqu'à la ville. De nombreuses extensions peuvent être envisagées, notamment l'intégration de la simulation locale dans une simulation à l'échelle des systèmes de ville [26]. De telles études de la forme urbaine indépendamment supposent une certaine indépendance entre la société et la forme urbaine ou, tout du moins, un certain délai entre l'action de la société sur la forme urbaine et de l'impact de cette dernière sur la société [27, 28]. Ainsi, de futurs travaux concerneront l'intégration d'agents sociaux dans la simulation [29, 30]. Un tel système, utilisant à la fois des agents morphologiques et sociaux pourraient alors permettre une étude de ces interactions entre société et la forme urbaine. D'autres sources de données peuvent par ailleurs être intégrées au système, notamment des données foncières, le parcellaire et les plan locaux d'urbanisme. Ces derniers sont particulièrement importants puisqu'ils permettront alors de tester différentes simulations pour évaluer l'impact du changement de ces plans locaux d'urbanisme sur les évolutions urbaines.

## Références

- [1] Thériault, M., Des Rosiers, F. : Information géographique et dynamiques urbaines 1 : analyse et simulation de la mobilité des personnes. Traité IGAT, série Aménagement et gestion du territoire, Hermès - Lavoisier, 290 pages (2008)
- [2] Bertalanffy, L. von : General System Theory. Penguin Books, Harmondsworth, Middlesex, UK (1972)
- [3] Morin, E. : Introduction à la pensée complexe. Seuil, 158 pages (2005)
- [4] Gilbert, N., Troitzsch, K.G. : Simulation for the social scientist. Open University Press, 295 pages (1999, 2005)
- [5] Batty, M. : Cities and Complexity : Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals. MIT Press, 584 pages (2007)
- [6] Monod, J. : Le Hasard et la Nécessité. Essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne Seuil (1970)
- [7] Lamarche, F., Donikian, S. : Automatic Orchestration of Behaviours through the management of Resources and Priority Levels. In : *Autonomous Agents and Multi Agent Systems*. ACM, Bologna, Italy (2002)
- [8] Perret, J., Boffet-Mas, A., Ruas, A. : Understanding Urban Dynamics : the use of vector topographic databases and the creation of spatio-temporal databases. In *Proceedings of the 24<sup>th</sup> International Cartography Conference (ICC'09)* (2009)
- [9] Couclelis, H. : From cellular automata to urban models : new principles for model development and implementation. *Environment and Planning B : Planning and Design* 24 (2), 165-174 (1997)
- [10] White, R., Engelen, G. : Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling. *Environment and Planning B : Planning and Design* 24 (2), 235-246 (1997)
- [11] Batty, M., Barros, J., Alves, S. : Cities : continuity, transformation and emergence. Working paper. CASA Working Papers (72). Centre for Advanced Spatial Analysis (UCL), London, UK (2004)
- [12] Batty, M. : Cities as complex systems : scaling, interactions, networks, dynamics and urban morphologies. Working paper. CASA Working Papers (131). Centre for Advanced Spatial Analysis (UCL), London, UK (2008)
- [13] Werner, P. : Application of Cellular Automata and Map Algebra in Studies of Land Use Changes. The Neighborhood Coefficients Method. *Geoinformatica Polonica*, vol.9., Polska Akademia Umiejetności - Wydawnictwo, Kraków (2009)
- [14] Batty M., Xie Y. : Possible urban automata. *Environment and Planning B : Planning and Design*, vol.24, n°2, p.175-192 (1997)
- [15] O'Sullivan, D. : Graph-based cellular automata models of urban spatial processes. Ph.D. Thesis. University College London, London (2000)
- [16] O'Sullivan, D. : Exploring spatial process dynamics using irregular cellular automaton models. *Environment and Planning B : Planning and Design*, vol.28, p. 687-705 (2001)
- [17] Badariotti, A., Banos, A., Moreno, D. : Conception d'un automate cellulaire non stationnaire à base de graphe pour modéliser la structure spatiale urbaine : le modèle Remus. *Cybergeog*, Sélection des meilleurs articles de SAGEO 2006, article 403 (2007)
- [18] Lamy, S., Ruas, A., Demazeau, Y., Baeijs, C., Jackson, M., Mackaness, W., Weibel, R. : Agent project : Automated generalisation new technology, in *5<sup>th</sup> EC-GIS Workshop*, Stresa, Italy (1999)
- [19] Duchêne, C., Gaffuri, J. : Combining three multi-agent based generalisation models : Agent, cartacom and gael. In : Ruas, A., Gold, C. (Eds.), *Headway in Spatial Data Handling*. pp. 277-296 (2008)



- [20] Gaffuri, J. : Three reuse example of a generic deformation model in map generalisation. In Proceedings of the 24<sup>th</sup> International Cartographic Conference, Santiago, Chile (2009)
- [21] Curie, F., Perret, J., Ruas, A. : Simulation of urban blocks densification. In Proceedings of the 13<sup>th</sup> AGILE International Conference on Geographic Information Science, Guimarães, Portugal (2010)
- [22] Mezura, C., Occeolo, M., Demazeau, Y., Baeijs, C. : Récursivité dans les systèmes multi-agents : vers un modèle opérationnel In : Gleizes, M. P., Marcenac, P. (Eds.), Ingénierie des systèmes multi-agents, actes des 7<sup>ièmes</sup> journées francophones d'intelligence artificielle distribuée et systèmes multi-agents JFIAD-SMA'99. Hermès, pp. 41-52 (1999)
- [23] Boffet, A. : Méthode de création d'informations multi-niveaux pour la généralisation cartographique de l'urbain Marne la Vallée Paris Est university, COGIT laboratory (2001)
- [24] Lesbegueries, J., Lachiche, N., Braud, A., Skupinski, G., Puissant, A., Perret, J. : A platform for Spatial Data Labeling in an Urban Context In Proceedings of the International Opensource Geospatial Research Symposium, Nantes, France (2009)
- [25] Bossard, M., Feranec, J., Otahel, J. : CORINE land cover technical guide - Addendum 2000 Technical report No 40, EEA (European Environment Agency) (2000)
- [26] Sanders, L., Favaro, J.-M., Mathian, H., Pumain, D., Glisse, B. : Intelligence artificielle et agents collectifs : le modèle EUROSIM Cybergeo, Sélection des meilleurs articles de SAGEO 2005 (2007)
- [27] Roncayolo M. : Lectures de villes, formes et temps. Eupalinos, Parenthèses, Paris, 386 pages (2002)
- [28] Ducom E. : Le modèle des ceintures limitrophes (fringe belts) : une application aux villes françaises. PhD Thesis, Université de Rennes 2 Haute Bretagne, 292 pages (2005)
- [29] Holmes, E., Holme, K., Mäkilä, K., Kauppi Mattson M., Mörtvik, G. : The sverige spatial microsimulation model, content, validation, and example applications Umea university, gerum kulturgeografi (2002)
- [30] INSEE Direction des Etudes et Synthèses Economiques : Le modèle de microsimulation dynamique DESTINIE Série des documents de travail de la Direction des Etudes et Synthèses Economiques (1999)