

# DE LA STRUCTURE SPATIALE AUX DYNAMIQUES URBAINES : LES AUTOMATES RETICULAIRES

**Diego Moreno**

*Laboratoire SET – UMR 5603 CNRS  
Université de Pau et des Pays de l'Adour  
IRSAM, avenue du Doyen Poplawski  
64000 Pau  
[diego.moreno@etud.univ-pau.fr](mailto:diego.moreno@etud.univ-pau.fr)*

## 1. Contexte

Les Grecs anciens, notamment Platon (-370 ?) et Aristote (-340 ?), établissaient un lien étroit entre la morphologie de la ville et la qualité de la société urbaine. Aujourd'hui ce lien entre forme et fonctionnement redevient d'actualité : la dynamique du système urbain dépend de la structure morphologique actuelle de la ville. Pour mieux comprendre le fonctionnement de la ville, et mieux évaluer l'impact des politiques d'aménagement menées, il fait donc sens de chercher à mieux comprendre sa forme.

Les automates cellulaires offrent un cadre conceptuel et méthodologique particulièrement approprié pour explorer, de manière expérimentale, les relations entre fonctionnement et forme. Toutefois, en dépit d'apports importants de la communauté des géographes au formalisme mathématique et informatique des automates cellulaires dans l'objectif de mieux prendre en compte les spécificités de l'espace et des processus géographiques (Ménard *et al.*, 2004), une caractéristique essentielle nous semble aujourd'hui encore faire défaut. Les relations de voisinage entre unités géographiques sont en effet le plus souvent déterminées d'une part selon des critères topologiques (contiguïté) ou métriques (distance euclidienne), et d'autre part sur une base stationnaire, deux options qui traduisent peu ou mal les différenciations spatiales induites par les réseaux et les modes de transport.

Les premiers modèles urbains plaçaient déjà l'accessibilité intra-urbaine au centre de l'explication de l'agencement des différentes formes d'utilisation du sol (Alonso, 1964 ; Hansen, 1959). Mais les premières applications de la notion d'automate cellulaire à l'étude de la dynamique urbaine (Tobler, 1979 ; Codd, 1968 ; Albin, 1975 ; Nakajima, 1977) se basent sur l'influence de l'occupation du sol de chaque unité spatiale sur un voisinage immédiat. White et Engelen (1997) introduisent dans leur modèle la présence du réseau de transport, et l'intégration de la contrainte spatiale dans des modèles subséquents (Engelen *et al.*, 2002 ; Barredo *et al.*, 2003) permet de replacer l'accessibilité au cœur de l'automate cellulaire.

Toutefois, même si des modèles plus récents tiennent compte de l'influence des éléments d'infrastructure dans l'évolution urbaine à travers les fonctions de transition (Xie, 1996 ; Batty et Xie, 1997 ; Phipps et Langlois, 1997), l'hétérogénéité de l'espace est rarement prise en compte, du fait de la difficulté à définir des structures géométriques irrégulières dans ce genre de formalisation. Les géographes ont très tôt souligné (Takeyama et Couclelis, 1997) que ces contraintes, peu raisonnables pour décrire les structures d'un espace géographique, méritaient d'être en partie au moins relâchées. O'Sullivan (2001a) a démontré qu'un examen du formalisme des automates cellulaires s'avère nécessaire, en raison de la sensibilité remarquable de certains processus spatiaux à des petites modifications des structures spatiales.

## 2. Les automates réticulaires

Dans cette perspective, nous proposons un automate à base de graphes mathématiques permettant de mieux rendre compte, à terme, de l'impact de la morphologie sur le fonctionnement et l'évolution des systèmes urbains. A cet effet, nous nous intéressons plus précisément aux diverses constructions qui forment la ville et à leurs relations spatiales. Le modèle REMUS (Reticular Model for Urban Simulation) permet de représenter la structure spatiale urbaine sous la forme d'un graphe mathématique, afin d'explorer les proximités entre les entités spatiales du bâti, à travers les réseaux de transport urbain.

En nous inspirant des travaux de Chua et Yang (1988), Schonfish (1997) et de O'Sullivan (2000, 2001a, 2001b), nous avons cherché à dépasser cette stationnarité, en nous focalisant dans un premier temps sur sa composante structurelle, par trop irréaliste dans un environnement urbain. Nous sommes ainsi partis du principe qu'il faisait sens de prendre les éléments bâtis comme unités urbaines élémentaires, et de remplacer la stricte contiguïté par une distance de voisinage. On peut ainsi considérer que deux unités spatiales sont voisines si la distance euclidienne entre leurs deux centroïdes est inférieure à une distance  $d_{seuil}$  donnée :

$$d(U_i(x_i, y_i); U_j(x_j, y_j)) \leq d_{seuil} .$$

Travailler ainsi à partir de distances euclidiennes implique toutefois, au-delà des avantages techniques procurés, d'accepter l'hypothèse d'un espace fondamentalement isotrope : pour une distance seuil donnée, le graphe de voisinage ne dépend que de l'agencement spatial des unités  $U_i$ . Or, il est évident que l'existence de réseaux de transport aux capacités différenciées, vient perturber fortement cette hypothèse. Ainsi, raisonner en terme d'accessibilité réseau, pour un mode de transport donné, revient à introduire l'anisotropie fondamentale de l'espace géographique dans la construction même de l'automate cellulaire.

La multiplicité des relations possibles entre les entités spatiales et la variabilité spatiale et temporelle de ces relations, induites par la nature et l'évolution des déplacements urbains et des modes de transports, nous incite à mieux spécifier les relations spatiales. Nous proposons en particulier d'introduire un voisinage spécifique pour chaque cellule, susceptible d'évoluer dans le temps, et qui permette de rendre compte de toute la complexité des relations spatiales dans la ville. Les relations de voisinage sont donc fondamentalement fonctionnelles et non simplement géométriques.

### 3. Le modèle REMUS

Dans cette perspective, la construction du graphe de relations implique au préalable :

- la construction d'un *graphe urbain*  $G(S, A)$ , dont les sommets incluent les noeuds du réseau routier et les bâtiments, et dont les arcs sont constitués de tronçons de route et de connecteurs bâti/route.
- l'exécution au sein du graphe urbain d'algorithmes de parcours de graphe afin de calculer le temps de trajet, par le plus court chemin et pour un mode de transport donné, entre tous les couples de sommets  $\{S_i; S_j\}$  du graphe  $G(S, A)$ . Ce procédé aboutit à la création d'un *graphe fonctionnel*, plein et non planaire  $G'(U / U \subset S, K)$ , constitué des sommets représentant les bâtiments et des arcs représentant les temps minimaux de parcours par le réseau entre toutes les paires possibles de bâtiments, pour un mode de transport donné.
- la construction du *graphe de relations*  $G_r''(U, R_r / R_r \subset K)$ , sous-graphe du graphe fonctionnel, dont les sommets représentent les bâtiments et les arcs les relations de voisinage pour un temps de trajet donné  $t_{seuil}$ , tel que,  $t(U_i; U_j) < t_{seuil}$ .

La structure même du graphe de relations ainsi généré est porteuse d'information, puisqu'elle ne dépend pas uniquement de l'agencement des unités spatiales élémentaires, mais également de leurs relations spatiales à travers l'accessibilité routière. Chaque graphe de relations de voisinage est caractéristique d'un mode de transport et d'un temps seuil de parcours, et il est le produit d'une série de procédés d'abstraction qui visent à mettre en évidence la structure de l'accessibilité intra-urbaine. Le graphe de relations permet donc de définir de manière dynamique des voisinages irréguliers correspondant aux déplacements urbains.

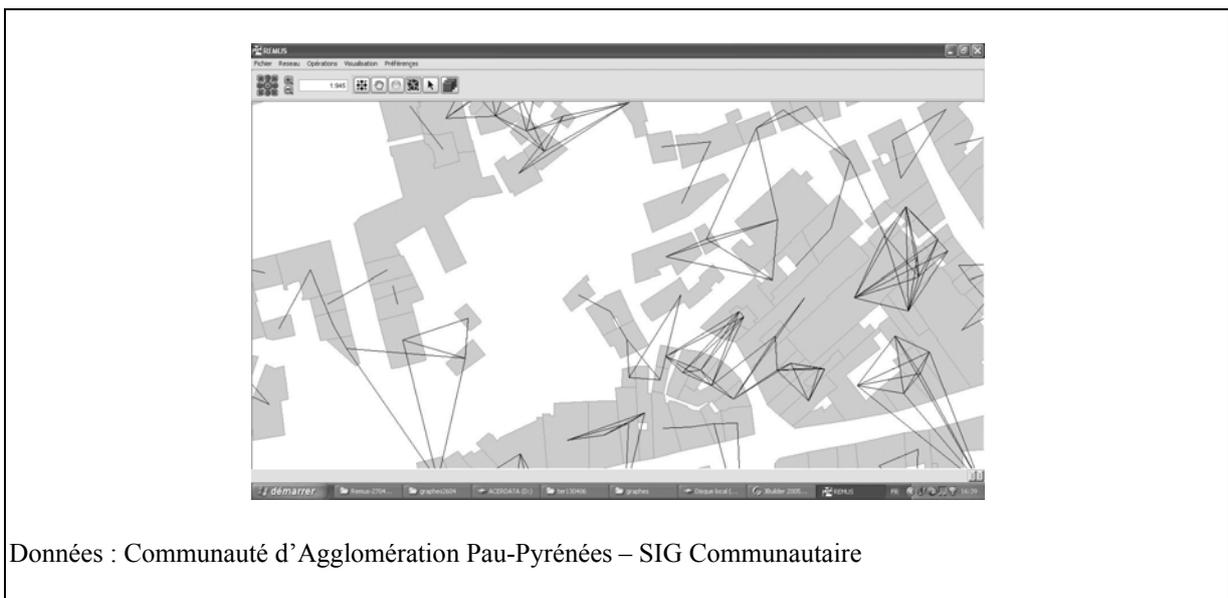
L'application REMUS (Reticular Model for Urban Simulation), créée en collaboration avec des chercheurs en informatique du LIUPPA, permet de générer ces différents graphes (graphe urbain et graphe des relations) et de poser les bases d'un automate cellulaire anisotrope et non stationnaire susceptible à terme de mieux prendre en compte les relations spatiales dans la simulation des dynamiques urbaines.

La génération du graphe urbain implique l'importation de données géométriques à partir d'un Système d'Information Géographique. REMUS crée des carrefours à l'intersection des tronçons de route, regroupe les différentes lignes composant un tronçon de route entre deux carrefours, et génère le graphe routier avec les carrefours comme sommets et les tronçons comme arcs. Ensuite, REMUS incorpore les données du bâti dans le graphe, en générant les accès du bâti au réseau routier de manière automatique. Ces deux opérations permettent

de générer le graphe urbain, qui représente l'ensemble des bâtiments et leurs interconnexions via le réseau routier.

Dans une deuxième étape, le graphe urbain permet de créer le graphe de relations pour des distances-seuils variables. Cette étape implique de valuer au préalable le graphe urbain avec des temps de parcours dérivés de la longueur géométrique et de la vitesse moyenne de chaque tronçon. Ensuite, une stratégie de parcours de graphe est mise en place, à l'aide de l'algorithme de Floyd-Warshall (Floyd, 1962). Cet algorithme calcule le plus court chemin entre toutes les paires de sommets possibles dans le graphe urbain. Toutefois, compte tenu de la complexité de cet algorithme et afin de réduire les temps des calculs, une solution de parcours de graphe a été adoptée visant à restreindre les parcours. Le graphe urbain comporte ainsi deux niveaux : le sous-graphe des connecteurs bâti/route  $G(B,E)$  et le sous-graphe routier  $G(C,T)$ . Dans un premier temps, l'algorithme de Floyd est appliqué seulement au sous-graphe routier, puis les parcours sont étendus aux connecteurs bâti/route en associant chaque bâtiment à un carrefour. Cette stratégie originale d'exploration à deux niveaux permet de traiter de grandes bases de données, comme les bases de données cadastrales, en réduisant le nombre de sommets parcourus et en diminuant le nombre d'itérations de l'algorithme de manière vertigineuse. À l'issue du parcours de graphe, une matrice des temps de parcours entre paires de bâtiments est générée. Cette matrice correspond au graphe complet  $G'(U,K)$  dans lequel les sommets  $U$  représentent les bâtiments, et la valuation de chaque arc  $K$  correspond à la distance/temps de parcours entre bâtiments à travers le réseau urbain.

Une hiérarchisation des distances/temps de parcours permet d'effectuer la sélection des voisins de chaque bâtiment pour une distance seuil donnée. Finalement, le graphe de relations de voisinage  $G''(U,R)$  est généré pour la distance seuil choisie (Figure 1). On obtient ainsi une visualisation locale des proximités entre bâtiments par le réseau routier et non à vol d'oiseau.



**Figure 1.** Exemple de génération d'un graphe de relations de voisinage à 25m avec l'application REMUS.

#### 4. Conclusions

L'étude des relations spatiales entre immeubles d'une même ville peut donc se faire à partir de l'étude des matrices cadastrales les répertoriant et de la caractérisation des relations spatiales entre ces immeubles. Cette caractérisation peut prendre un aspect innovant sous la forme d'un automate cellulaire géographique, à même de représenter à la fois les liens de proximité entre immeubles dans l'espace euclidien de la ville, mais aussi dans l'espace du réseau de circulation. Cette nouvelle formalisation offre plusieurs avantages, à la fois méthodologiques, scientifiques et thématiques, que nous proposons d'explorer à l'avenir.

D'un point de vue méthodologique, le fait de s'en tenir à une formalisation correspondant rigoureusement à la théorie des graphes nous permet de nous servir des nombreux outils mathématiques et informatiques développés pour analyser des graphes de grande dimension. Par ailleurs la définition d'un automate cellulaire à base de graphe mathématique permet de représenter des dynamiques fondées sur deux types de proximités : une proximité aréale, basée sur une distance euclidienne, et une proximité fonctionnelle par le réseau.

D'un point de vue scientifique par ailleurs, cette approche permet de bénéficier des développements nombreux de la recherche sur les graphes, en mathématiques, en physique, en biologie et dans les sciences sociales. La mise en évidence de divers modèles de réseaux existants (Erdős-Rényi 1959, Watts-Strogatz 1998, Albert-Barabasi 1999) et l'étude de leurs propriétés pourra ainsi directement être appliquée à l'étude des graphes urbains.

Enfin, d'un point de vue thématique, cette représentation originale de la ville en tant qu'espace euclidien et qu'espace en réseau, ouvre la voie à de vastes champs d'applications dans le domaine de la géographie urbaine et des études d'urbanisme. Il deviendra ainsi possible de mieux étudier les stratégies de déplacements en interaction avec le trafic routier et en liaison avec les contraintes morphologiques des villes. Il deviendra également possible de développer la représentation des modifications urbaines, des plus petites (mise un sens interdit d'une rue) au plus générales (création d'un nouveau quartier) et de mieux mesurer leurs impacts sur l'ensemble de la ville. Enfin, on pourra développer les études d'impact ou les études de bonne gouvernance des villes, à partir de la définition de communautés locales, ou de communautés de voisinages, reposant sur des principes à la fois euclidiens et réseautiques.

Au final, nous gageons que l'approche de la ville à partir d'un automate cellulaire aux caractéristiques structurelles et à terme fonctionnelles plus réalistes, permet d'améliorer la compréhension du fonctionnement et des effets de ses formes spatiales. Dans la mesure où la morphologie urbaine est générée à partir de l'action d'agents individuels dans la société et des politiques d'aménagement du territoire, notre approche participe à l'éclairage des phénomènes émergents –processus, interactions et formes– à l'interface des sociétés humaines et de l'espace, à l'aide de la théorie des systèmes complexes et des outils de modélisation associés.

## 5. Bibliographie

- Albert R., Barabasi A.-L., « Statistical mechanics of complex networks », *Review of modern physics*, 74, 2002, p. 47-97.
- Albin P.S., *The analysis of complex socioeconomic systems*, Lexington, Lexington Books, 1975.
- Alonso W., *Location and land use : toward a general theory of land rent*, Cambridge, Harvard University Press, 1964.
- Aristote, *La politique. L'homme animal civique*. Paris, Gonthier, PUF, 1980, 1ère ed. -340 ?, 288 p.
- Barredo J.I., Kasanko M., McCormick N., Lavallo C., « Modelling dynamic spatial processes : simulation of urban future scenarios through cellular automata », *Landscape and Urban Planning*, n°64, 2003, p. 145-160.
- Batty M., Xie Y., « Possible urban automata », *Environment and Planning B : Planning and Design*, vol.24, n°2, 1997, p.175-192.
- Chua L., Yang L., « Cellular neural networks: theory and applications », *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1988, p. 1257-1290
- Codd E., *Cellular automata*, New York, Academic Press, 1968.
- Engelen G., White R., Uljee I., « The MURBANDY and MOLAN models for Dublin », Submitted to European Commission Joint Research Center, Ispra, Italy. Dublin, ERA-Maptec : 172, 2002.
- Erdős P., Rényi A., « On random graphs », *Publicationes Mathematicae*, Debrecen, n°6, 1959, p. 290-297
- Floyd R.W., « Algorithm 97: Shortest Path ». *Communications of the ACM*, vol.5, n°6, 1962, p. 345.

- Hansen W.G., « How accessibility shapes land use », *Journal of the American Institute of Planners*, n°25, 1959, p. 73-76.
- Kaufmann A. *Des points et des flèches... La théorie des graphes*. Paris, Dunod, 1968, 155 p.
- Langlois A., Phipps M., *Automates cellulaires : application à la simulation urbaine*, Paris, ed. Hermes, 1997.
- Ménard, A, Filotas, E Marceau D., " Automates cellulaires et complexité : perspectives géographiques". Documents de l'IAG, 2004, : <http://www.iag.asso.fr/>
- Nakajima T., « Application de la théorie de l'automate à la simulation de l'évolution de l'espace urbain », Congrès sur la Méthodologie de l'Aménagement et du Développement, Montréal, Association Canadienne-Française pour l'Avancement des Sciences et Comité de Coordination des Centres de Recherche en Aménagement, Développement et Planification (CRADEP), 1977, p. 154-160.
- O'Sullivan D., Graph-based cellular automata models of urban spatial processes, Thèse de doctorat, University College London, London, 2000.
- O'Sullivan D., « Exploring spatial process dynamics using irregular cellular automaton models », *Environment and Planning B : Planning and Design*, vol.28, 2001, p. 687-705.
- O'Sullivan D., « Graph-cellular automata : a generalised discrete urban and regional model », *Geographical Analysis*, vol.33, n°1, 2001.
- Phipps M., Langlois A., « Spatial dynamics, cellular automata, and parallel processing computers », *Environment and Planning B : Planning and Design*, vol.24, n°2, 1997, p. 687-705.
- Platon, *La République*. Paris, Garnier Flammarion, 1966, 1<sup>ère</sup> ed. -370 ?, 507 p.
- Schonfisch B., « Anisotropy in cellular automata », *BioSystems*, vol.41, 1997, p. 29-41.
- Takeyama M., Couclelis H., « Map dynamics : integrating cellular automata and GIS through Geo-Algebra », *Int. J. Geographical Information Science*, vol.11, n°1, 1997, p. 73-91.
- Tobler W., « Cellular Geography », *Philosophy in Geography*, S. Gale and G. Ollson, Dordrecht, Kluwer, 1979, p. 379-386.
- Watts D.J., Strogatz S. H., « Collective dynamics of 'small-worlds' networks », *Nature* n°393, 1998, p. 440-442
- Weisbuch G., *Dynamique des Systèmes Complexes ; une introduction aux réseaux d'automates*, Paris, InterEditions / CNRS, 1989
- White R., Engelen G., « Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling », *Environment and Planning B : Planning and Design*, vol.24, n°2, 1997, p. 235-246
- Xie Y.C., « A generalized model for cellular urban dynamics », *Geographical Analysis*, vol.28, n°4, 1996, p. 350-373.