

TITRE

Merwan Achibet

Résumé

abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract ab-
stract abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract
abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract
abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract
abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract
abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract abstract

1 Introduction

2 État de l'art

La modélisation de systèmes complexes est longtemps uniquement passée par l'usage de méthodes mathématiques; typiquement, des systèmes d'équations différentielles. Ces techniques permettent de décrire des lois d'évolution et d'observer, ainsi que de prédire par extrapolation, le comportement de phénomènes du réel. Dans le cas de systèmes prenant en compte un vaste jeu de paramètres, cette approche peut néanmoins se révéler délicate à employer. Plus intrinsèquement, même si une telle modélisation est basée sur des observations ancrées dans la réalité, il s'agit d'une représentation conceptuelle d'un problème et aucune mimique des mécaniques sous-jacentes ne s'opère.

D'un point de vue historique, les prémices de l'informatique moderne et d'un tout autre paradigme de modélisation sont à attribuer aux esprits du milieu du vingtième siècle. Alan Turing introduit en 1936 la machine éponyme qui, bien que purement théorique, possède un module de contrôle ainsi qu'une mémoire et peut donc exécuter toutes sortes de procédures. Cette démarche se démarque de l'approche mathématique et semble plus humaine ; on ne résout pas un problème en utilisant des fonctions associant une quantité à un résultat mais on agit véritablement sur les données du problème. L'idée de base de Turing était d'ailleurs d'assimiler le fonctionnement de sa machine au travail d'une personne remplissant les cases d'un

tableau infini CITATION?.

Entraîné par cette mouvance procédurale et en réaction aux réseaux de neurones de McCulloch et Pitts, John von Neumann introduit le terme d'automate en 1946. Simplement, un automate est une machine qui opère en fonction de règles internes prédéfinies sur des données fournies en entrée. On choisit de se concentrer sur une sous-catégorie d'automates, les automates finis à états, changeant leur représentation interne selon des règles de transition. John von Neumann et Stanislaw Ulam joignent leurs travaux pour concevoir l'automate cellulaire : un système comprenant un ensemble d'automates à états spatialement localisés (typiquement sous forme de grille) et interconnectés en fonction de leur proximité. Les entrées de chaque automate correspondent alors aux états des automates voisins et de cette organisation se dégagent de fortes relations d'interdépendance CITATION ?. Le jeu de la vie de Conway en est un exemple classique. La simplicité de ses règles, mise en contraste avec la variété des configurations engendrées, témoigne de la richesse des automates cellulaires CITATION ?.

Les automates cellulaires ont depuis été extensivement étudiés et sont appliqués à de nombreux phénomènes biologiques, physiques et sociaux [1]. La motivation d'Ulam lors de leur conception était d'ailleurs de modéliser la croissance de cristaux. On peut aussi citer la simulation de la dynamique des fluides [2], de la croissance de tumeurs [3], de la diffusion d'épidémies [4] de la ségrégation de population CITATION-SCHELLING. Leur caractère spa-

tial laisse supposer qu'ils sont particulièrement adaptés aux applications géographiques, et plus précisément, urbaines. Ils ne furent paradoxalement pas immédiatement exploités à cet effet et c'est seulement suite à un article de Waldo Tobler, en 1975, que le rapprochement entre les automates cellulaires et le domaine de la géographie apparaît clairement [5].

Une idée très exploitée dans ce domaine est d'associer un potentiel de transition à chaque cellule et vers tous les états qu'elles peuvent prendre. Dans les modèles déterministes, la transition vers l'état à plus haut potentiel est appliquée tandis que dans les modèles stochastiques, un tirage aléatoire biaisé a lieu. Le potentiel d'une cellule à passer à un nouvel état est déterminé en fonction de paramètres propres à la simulation. Peuvent être pris en compte l'élévation du terrain, la densité de population, la proximité d'axes routiers, la proximité de centres urbains, l'âge des parcelles, leur valeur ; en fait, toute combinaison d'attributs relatifs à un réseau urbain. Par exemple, dans une simulation représentant les différents types d'usage terrestre, le passage d'une cellule à l'état *résidentiel* pourrait dépendre de la proximité des commerces et des routes et de l'éloignement des zones industrielles. Bien sûr, un nombre élevé de paramètres à prendre en compte requiert un couplage fin et l'impact de chaque variable peut être pondéré. Puisque les variations individuelles de paramètres n'émergent pas de manière transparente à la surface de la simulation, les modèles urbains basés sur des automates cellulaires doivent être finement calibrés et leur réalisme est un défi en soi. Pour contourner ce problème, Yeh et Li prône l'usage d'un réseau de neurones pour pondérer l'importance de chaque paramètre à partir de données cartographiques historiques [6].

Il est important de noter que la simplicité des règles régissant le fonctionnement d'un automate cellulaire strict s'oppose à la qualité de la simulation, notamment dans le cadre de modèles spécifiques [7]. Dans ce cas, une prise de liberté quant aux formalisme originel est autorisée, voire nécessaire, pour obtenir des résultats réalistes [8].

La première limite que le formalisme cellulaire de base impose est la discrétisation des états que chaque cellule peut adopter. Même si

cette caractéristique fait partie intégrante des particularités qui confèrent aux automates cellulaires leur simplicité, la description de quantités pouvant arborer un large éventail de valeurs est alors impossible. Plus concrètement, il est aisé de catégoriser les cellules d'un espace selon le fait, par exemple, qu'elles contiennent des installations humaines ou non (état booléen) [9, 10] ou de façon plus sophistiquée, en fonction de leur usage terrestre (*résidentiel*, *commercial* ou *industriel* [11] et plus [12]). Représenter des quantités réelles est plus délicat. Pour symboliser la densité d'un ensemble urbain, Semboloni utilise par exemple un automate cellulaire de dimension trois dans lequel plus une pile de cellules occupées est haute et plus la zone représentée est peuplée [13]. Plus généralement, on peut s'autoriser à représenter l'état d'une cellule par un vecteur pouvant contenir des valeurs réelles. Des règles de transitions adaptées et mesurées sont alors à mettre en place.

L'homogénéité d'un automate cellulaire fait partie intégrante de sa définition originelle : en mettant de côté l'état qu'elles adoptent, toutes les cellules sont identiques en forme et en structure de voisinage. Dans le cadre de notre problématique, cette approche est limitante car, dans une ville, les parcelles ne sont que rarement identiques et alignées. Similairement, la notion de voisinage est clairement à redéfinir. Pour des problèmes classiques, les voisinages de von Neumann et de Moore sont régulièrement utilisés mais la relation par contiguité qu'ils décrivent ne convient pas à la représentation des liens de dépendance à plus grande échelle se développant dans un système urbain. Le positionnement d'un bâtiment résidentiel dans une ville se base évidemment sur le voisinage direct des zones envisagées (on veut ajouter une maison dans un quartier résidentiel) mais il faut aussi prendre en compte les alentours plus distants (la centrale thermique se trouvant à 500 mètres du site peut poser problème). Une solution possible est d'étendre les voisinages de von Neumann et de Moore tout en conservant leur forme caractéristique. LIRE THESE O'SULLIVAN [14, 15].

La problématique temporelle est à aborder. Un automate cellulaire strict est synchrone, i.e. les changements d'état de toutes les cellules s'effectuent simultanément. Si le choix

était fait de mettre à jour chaque état de façon asynchrone, le comportement de l'automate lourdement modifié. Par exemple, les qualités auto-répliquatives de certaines entités du jeu de la vie ne seraient pas garanties. Il est pourtant légitime de se questionner sur la validité d'un tel choix dans une simulation urbaine, premièrement parce qu'une ville est un système complexe et désordonné, deuxièmement parce les processus qui s'y déroulent sont réglés sur différentes échelles temporelles.

Les automates cellulaires ne sont pas l'unique moyen de modéliser la croissance urbaine. Des systèmes multi-agent ont été utilisés [16, 17]. Dans ces cas, un agent s'apparente à un des prospecteurs immobiliers. Un tel agent peut acheter des terres, les vendre, les développer. DETAILS . D'autres articles s'éloignent des

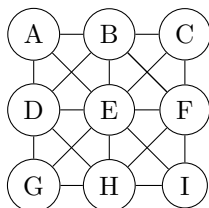
systèmes complexes et se basent sur l'application de règles géométriques. Dans ces cas, l'objectif est plutôt de générer des villes à l'apparence réaliste sans se soucier du réalisme fonctionnel. On peut citer l'exemple de BLABLA

Le sujet des routes n'a pas encore été abordé, et pourtant le réseau viaire est une moitié capitale de notre sujet ! Bien que les automates cellulaires soient couramment utilisés pour simuler le trafic routier (dans leur version une dimension CITATION ou deux dimensions CITATION). Ils sont peu applicables à la construction d'un réseau car LONG-RANGE FORME.

AGENTS EXTENDERS CONNECTORS
L-SYSTEME
HYPERSTREAMLINES
CO-EVOLUTION

A	B	C
D	E	F
G	H	I

(a) Automate cellulaire simple



(b) Automate cellulaire graphe

FIGURE 1

Références

- [1] Niloy GANGULY et al. "A Survey on Cellular Automata". Dans : (), p. 1–30.
- [2] U FRISCH, B HASSLACHER et U POMEAU. "Lattice-gas automata for the Navier-Stokes equation". Dans : *Physical review letters* (1986). URL : <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.56.1505>.

- [3] A.R. KANSAL et al. “Cellular automaton of idealized brain tumor growth dynamics”. Dans : *BioSystems* 55.1-3 (fév. 2000), p. 119–127. ISSN : 03032647. DOI : 10.1016/S0303-2647(99)00089-1. URL : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0303264799000891>
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303264799000891>.
- [4] S.C. FU et George MILNE. “Epidemic modelling using cellular automata”. Dans : *Proc. of the Australian Conference on Artificial Life*. 2003. URL : <http://200.17.137.110:8080/schisto/papers/papers/modelagem-matematico-computacional/epidemicmodellingusingca.pdf>.
- [5] Waldo TOBLER. “Cellular Geography”. Dans : (1975).
- [6] Anthony Gar-On YEH et Xia LI. “Urban Simulation Using Neural Networks and Cellular Automata for Land Use Planning”. Dans : *Advances in spatial data handling* (2002). URL : <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=UI6-czPSedIC&oi=fnd&pg=PA451&dq=Urban+Simulation+Using+Neural+Networks+and+Cellular+Automata+for+Land+Use+Planning&ots=eIvvJYURNx&sig=X1-Hjvm0ezzfNyRBMK2etTqbD1o>.
- [7] Paul M TORRENS et David O’SULLIVAN. “Cellular automata and urban simulation : where do we go from here?” Dans : *Environment and Planning B : Planning and Design* 28.2 (2001), p. 163–168. ISSN : 0265-8135. DOI : 10.1068/b2802ed. URL : <http://www.envplan.com/abstract.cgi?id=b2802ed>.
- [8] Roger WHITE. “Cities and Cellular automata”. Dans : *Discrete Dynamics in Nature and Society* 2.2 (1998), p. 111–125. ISSN : 1026-0226. DOI : 10.1155/S1026022698000090. URL : <http://www.hindawi.com/journals/ddns/1998/245791/abs/>.
- [9] Lucien BENGUIGUI, Daniel CZALANSKI et Rafael ROTH. *Modeling Cities in 3D : A Cellular Automaton Approach*. Rap. tech. 11. Israel Institute of Technology, 2004, p. 1829–1841.
- [10] Jeremy CORNU et Adrien DELCOURT. *Simulation de la dynamique spatiale urbaine par automate cellulaires*. Rap. tech.
- [11] Tom LECHNER, Seth TISUE et Andy MODDRELL. “Procedural Modeling of Urban Land Use”. Dans : ().
- [12] Edwige ; DUBOS-PAILLARD, Yves ; GUERMOND et Patrice LANGLOIS. “Analyse de l’évolution urbaine par automate cellulaire : le modèle SpaCelle”. Dans : *L’Espace géographique* 32 (2003), p. 357–.
- [13] Ferdinando SEMBOLONI. “The dynamic of an urban cellular automata in a 3-D spatial pattern”. Dans : *XXI National Conference*. 1997. Palermo, 2000, p. 20–22.
- [14] David O’SULLIVAN. “Graph-based Cellular Automaton Models of Urban Spatial Processes”. Thèse de doct. University of London, 2000.
- [15] David O’SULLIVAN. “Exploring Spatial Process Dynamics Using Irregular Cellular Automaton Models”. Dans : 33.1 (2001).
- [16] Thomas LECHNER et al. “Procedural City Modeling”. Dans : ().
- [17] Thomas LECHNER et al. “Procedural modeling of land use in cities”. Dans : *Cities* (2004). URL : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.131.7711>.