

TITRE

Merwan Achibet

Résumé

[illegible]

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, est capable d'exécuter des procédures DETAILS?. 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.

Entraîne 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, à partir de données fournies en entrées, produit des données en sortie et ce, en fonction de règles internes prédéfinies. 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 le premier automate cellulaire. Un automate cellulaire est un système comprenant un ensemble d'automates finis 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 fortes relations d'interdépendance se dégagent de cette organisation. Le jeu de la vie de Conway en est un exemple classique. La simplicité de ses règles, mise en contraste avec la variété des résultats produits, témoigne de la richesse des automates cellulaires CITATION.

Les automates cellulaires ont depuis été extensivement étudiés et servent de support à de nombreuses modélisations de phénomènes biologiques et physiques [5]. La motivation d'Ulam lors de leur conception était d'ailleurs de modéliser la croissance de cristaux. Ils sont aussi utilisés, entre autres, pour simuler la dynamique de fluides [4], la croissance de tumeurs CITA-

TION, les dynamiques proies-prédateurs CITATION.

Les automates cellulaires, notamment de par leur caractère spatial, semblent particulièrement appropriés 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 [11].

Il est important de remarquer que la simplicité des règles régissant le fonctionnement d'un automate cellulaire strict s'oppose à la qualité de la modélisation, notamment lors de la conception de modèles spécifiques [12]. Dans ce cas, une prise de liberté quant aux formalisme originel est autorisée, voire nécessaire, pour obtenir des résultats réalistes [13].

La première limite que le formalisme 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) [1, 2] ou de façon plus sophistiquée, en fonction de leur usage terrestre (résidentiel, commercial ou industriel [8] et plus [3]). Représenter des quantités réelles dans un automate cellulaire est plus délicat. Pour symboliser la densité d'un ensemble urbain, Sembloni 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 [10]. Plus généralement, on peut s'autoriser à représenter l'état d'une cellule par un vecteur pouvant contenir des valeurs réelles. DETAILS ?

L'homogénéité d'un automate cellulaire fait partie intégrante de sa définition de base. 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. Il est donc nécessaire de les représenter par des formes géométriques di-

verses. Ce postulat bouscule le formalisme strict et l'anisotropie du système. Il faut se demander si toutes les cellules ont le même impact sur leur environnement AIRE ? DENSITE ?

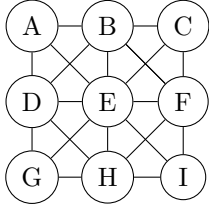
De la même façon, la notion de voisinage est clairement à redéfinir. Pour des problèmes classiques, les voisinages de von Neumann et de Moore sont régulièrement utilisés mais la relation par contiguité qu'ils décrivent ne convient pas à la représentation des liens de dépendance à plus grande échelle se développant dans un système urbain. Le positionnement d'un bâtiment résidentiel dans une ville se base évidemment sur le voisinage direct des zones considérées (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 envisagé peut poser problème). Une solution possible est d'étendre les voisinages de von Neumann et de Moore tout en conservant leur forme caractéristique CITATION. Une autre idée est d'utiliser un automate cellulaire graphe pour représenter un espace [9] et éventuellement de pondérer les arêtes en fonction de la distance euclidienne séparant deux entités.

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 d'un automate cellulaire serait lourdement impacté. 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 désorganisé, deuxièmement parce les processus qui s'y déroulent sont calibrés sur différentes échelles temporelles.

Maintenant que les limitations des automates cellulaires classiques sont annoncées, on peut présenter quelques exemples de simulations urbaines. 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 à plus haut potentiel est appliquée tandis que dans les modèles stochastiques, un tirage aléatoire biaisé a lieu. Le potentiel

A	B	C
D	E	F
G	H	I

(a) Automate cellulaire simple



(b) Automate cellulaire graphe

FIGURE 1

est déterminé en fonction de facteurs propres à la simulation. Peuvent être pris en compte l'élévation du terrain [10], la densité de population [], la proximité d'axes routiers, l'âge des parcelle, leur valeur et toute combinaisons de ces attributs. Bien sûr, plus le nombre de paramètres pris en compte est élevé, et plus la pondération BLABLA. PARAMETRES

Les automates cellulaires ne sont pas l'unique moyen de modélisation de la croissance urbaine. Certains articles [6, 7] prônent l'usage d'agents s'apparentant à 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
HYPERSTREAMLINES

Références

- [1] 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.
- [2] Jeremy CORNU et Adrien DELCOURT. *Simulation de la dynamique spatiale urbaine par automate cellulaires*. Rap. tech.
- [3] 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–.
- [4] 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>.

- [5] Niloy GANGULY et al. "A Survey on Cellular Automata". Dans : (), p. 1–30.
- [6] Thomas LECHNER et al. "Procedural City Modeling". Dans : ().
- [7] 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>.
- [8] Tom LECHNER, Seth TISUE et Andy MODDRELL. "Procedural Modeling of Urban Land Use". Dans : ().
- [9] David O'SULLIVAN. "Exploring Spatial Process Dynamics Using Irregular Cellular Automaton Models". Dans : 33.1 (2001).
- [10] 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.
- [11] W R TOBLER. "Cellular Geography". Dans : (1975).
- [12] 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>.
- [13] 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/>.