HAL open science

Cerner le contexte spatial par les voisinages dans les modèles cellulaires en géographie

Igor Agbossou

To cite this version:

Igor Agbossou. Cerner le contexte spatial par les voisinages dans les modèles cellulaires en géographie. Rencontres interdisciplinaires sur le contexte dans les systèmes complexes naturels et artificiels, Jan 2010, Megève, France. http://s4.csregistry.org/tiki-index.php?page=programmeRB2010. hal-00767179

HAL Id: hal-00767179

https://hal.science/hal-00767179v1

Submitted on 20 Dec 2012

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.

Cerner le contexte spatial par les voisinages dans les modèles cellulaires en géographie.

Igor AGBOSSOU
Maître de conférences en Aménagement et Urbanisme
Laboratoire ThéMA, UMR 6049, Université de Franche-Comté, France

igor.agbossou@univ-fcomte.fr

Résumé

Un automate cellulaire est un système dynamique, à la fois spatialement et temporellement discret. Les composantes d'un tel système sont des *lieux*, les *états* de ceux-ci et une *fonction de transition* permettant aux lieux de changer d'état. Entre autres préoccupations du modélisateur la compréhension et la prise en compte des relations entre les lieux sont primordiales. Et c'est là qu'interviennent les *voisinages* pour une meilleure prise en compte du contexte spatial que nous considérons pour chaque cellule comme étant un voisinage spécifiquement étendu, c'est-à-dire l'ensemble des lieux ayant potentiellement une certaine influence sur une cellule donnée. A partir d'une réflexion axée sur la typologie de Tobler et des voisinages de Moore et Von Neumann et d'autres travaux plus récents sur les automates cellulaires non stationnaires, nous proposons une vision plus large des contextes spatiaux dans les applications multi scalaires des modèles cellulaires en géographie par le biais des voisinages dynamiquement adaptatifs.

1 Introduction

L'étude des dynamiques spatiales constitue un des champs privilégiés de la recherche géographique. La nécessité de recourir à de nouvelles méthodes de modélisation et de simulation se fit sentir très vite dans le domaine de la dynamique urbaine. Les automates cellulaires (AC) constituent l'un des outils ayant conquis nombre de chercheurs en géographie dont les travaux ont contribué à une construction théorique des modèles d'AC. Dans leur forme canonique, établie depuis le début des années 1970, les AC furent déjà maintes fois introduits et expliqués dans diverses publications géographiques [1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7 ; 8 ; 9 ; 10]. Le point focal de ce papier est la compréhension et la prise en compte des relations entre les différents lieux formant l'espace cellulaire d'un modèle d'AC multi scalaires relativement aux thématiques concernées. Après un survol de quelques aspects de la modélisation par AC, l'exposé d'un modèle d'application concrète nous permettra de livrer quelques réflexions et perspectives pour une meilleure prise en compte du contexte spatial dans les modèles cellulaires en géographie.

2 Modélisation par automates cellulaires

La modélisation d'une problématique spatiale par automate cellulaire nécessite un travail d'analyse préalable d'identification et de mise en évidence de l'ensemble des caractéristiques fonctionnelles du problème à traiter. Conformément à la définition formelle d'un automate cellulaire proposée par Langlois et Phipps [2, op. cit.], ces caractéristiques doivent obéir, entre autres, aux conditions et principes de modélisation d'un automate cellulaire : l'espace cellulaire, les états, le voisinage, la configuration initiale, les règles de transition, les modes d'itération (déterministe ou stochastique, synchrone ou asynchrone), et la procédure générale. Dans cette section, nous nous intéressons aux lieux et leurs états possibles, la typologie spatiale et les implications de la fonction de transition.

2.1 Des lieux et des états

Le maillage de la zone d'étude spatialisée d'un modèle d'AC permet d'obtenir un ensemble d'objets disposés selon une topologie bien précise appelés cellules. Ces *cellules* qui, d'un point de vue technique possède des caractéristiques (résolution spatiale, voisins) sur lesquelles nous reviendrons, ne sont que la représentation de lieux géographiques.

2.1.1 Les lieux

Nous parlerons indifféremment de *cellules* ou de *lieux*. En fonction de leur occupation du sol (nous considérons ici les applications géographiques des modèles cellulaires aux thématiques à référence spatiale), ces lieux peuvent être considérés d'un point de vue statique ou dynamique.

D'un point de vue statique, les lieux d'un AC peuvent d'abord être considérés comme les *variables d'objets* de la logique des prédicats. Si x est un lieu et que B est une propriété – comme « contenir des bâtiments à usage commercial » – nous pouvons énoncer que telle et telle unités discrètes de la zone d'étude contiennent des bâtiments à usage commercial par l'expression « B(l) », où B est un *prédicat* de l. Comme dans la logique des prédicats, il est alors possible formuler des *propositions* comme $\forall l(\mathrm{B}(l))$, « toutes les unités discrètes de la zone d'étude contiennent des bâtiments à usage commercial » ou $\exists l(\mathrm{B}(l))$, «il existe au moins une unité spatiale contenant des bâtiments à usage commercial».

Néanmoins, déjà d'un point de vue statique, les lieux d'un AC se distinguent de simples variables d'objets, utilisées dans la logique des prédicats. Cela d'abord par le fait que tout lieu l est d'emblée considéré comme faisant partie d'un *ensemble*, noté L et englobant tous les lieux de ce que l'on appelle, justement, un « automate cellulaire ». Ainsi, tout AC est d'abord un ensemble $L = \{l_1, l_2, \ldots,$

l_{n-1}, l_n}, où n est le nombre total des lieux. Pour nous référer à ces lieux, nous utiliserons la notation suivante :

L pour désigner l'ensemble des lieux d'un AC.

l_i pour désigner un lieu particulier $l_i \in L$.

Mais la grande différence entre les lieux spatiaux d'un AC et les variables d'objets réside dans la nature dynamique du modèle. Ce n'est en effet, que d'un point de vue dynamique (dans lequel réside par ailleurs la spécificité même du modèle cellulaire) que chaque lieu apparaît comme un automate. C'est-à-dire, comme un objet mathématique défini en tant que "*système capable de se placer dans un certain nombre d'états [...] susceptible de recevoir d'un environnement une donnée à laquelle il réagit en changeant d'état et en produisant éventuellement une sortie*." [11]. En géographie cellulaire, la « *donnée reçue de l'environnement* » consiste pour chaque lieu, dans la valeur des prédicats, en un ensemble d'états d'autres lieux (les voisins). La sortie d'un lieu ne sera rien d'autre que son propre *état*, dans un temps immédiatement futur.

2.1.2 Les états

Dans les applications géographiques à référence spatiale, chaque cellule matérialise une occupation du sol qui correspond à un état. L'ensemble des états possibles de chaque cellule est donc un sous ensemble de toutes les occupations du sol identifiées pour la thématique étudiée. Chaque lieu a donc au moins un état. Ainsi, par exemple, même un lieu qui ne serait « rien » possède au moins le prédicat de ne rien être. C'est par ce prédicat qu'il se distingue des autres lieux et acquiert par-là une effectivité.

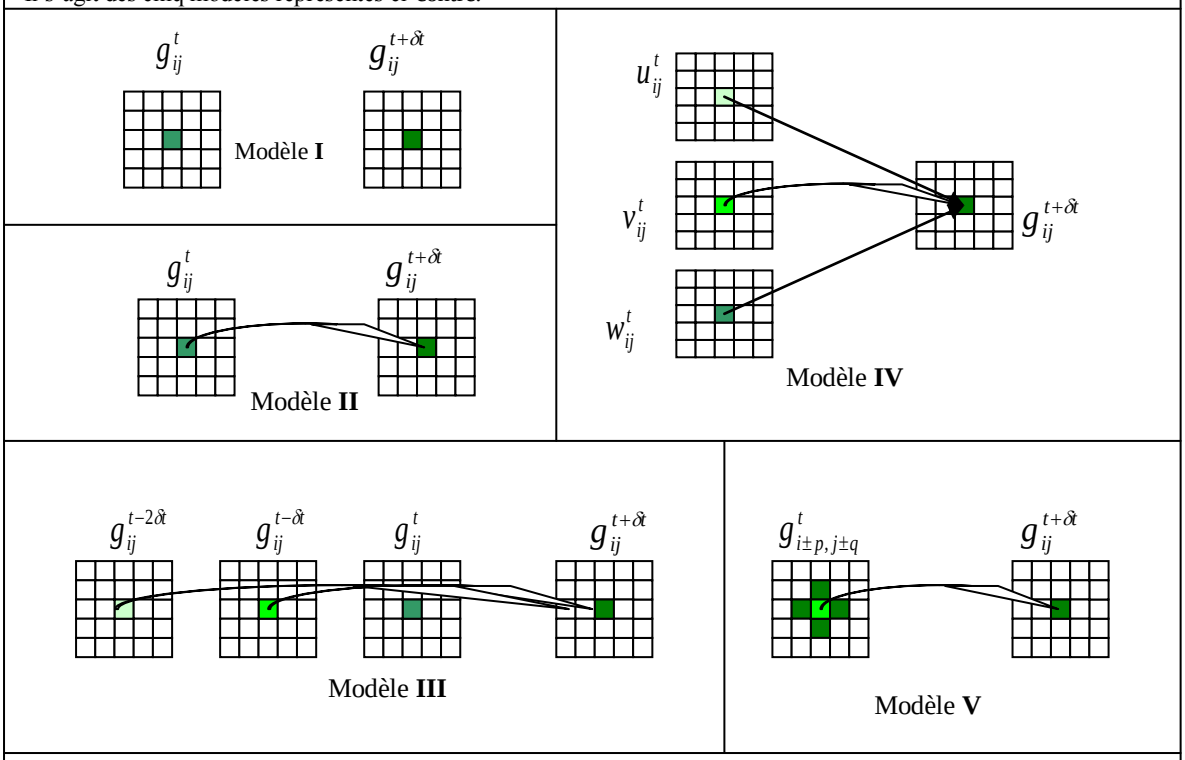
En ce qui concerne la définition mathématico-géographique d'un modèle d'AC, il ne nous reste à présent qu'à aborder la question "par quel mécanisme un lieu passe d'un état à un autre? Dans les conditions initiales d'une simulation, ceux-ci seront attribués par le géographe lui-même conformément à la réalité et la problématique de l'espace géographique simulé, de manière homogène ou hétérogène pour l'ensemble des lieux. Par la suite cependant, au sein de la dynamique du modèle cellulaire, le passage d'un état à un autre s'opère grâce à la fonction de transition.

2.2 Fonction de transition et typologie spatiale des AC

La fonction de transition portée par les lieux en tant qu'automates assure la dynamique d'un modèle cellulaire. Elle exprime les conditions sous lesquelles chacune des cellules peut changer d'état d'une configuration à l'autre entre deux pas de simulation. Les conditions précisent également quels états peuvent transiter vers quels autres états.

Dans son article de 1979, Waldo Tobler [1, op. cit.] à présenté les différentes modalités sous lesquelles peuvent être conduites des transitions dans un automate cellulaire à visée géographique.

Pour illustrer le principe des transitions des cellules d'une occupation du sol au temps t à une autre au temps $t+\delta t$, il posa que si g^t_{ij} est la catégorie d'occupation du sol d'une cellule localisée par ses coordonnées i (abscisse) et j (ordonnée) dans l'espace cellulaire au temps t, et que $g_{ij}^{t+\delta t}$ est l'occupation du sol de cette même cellule, à un autre temps (le moment $t+\delta t$), alors cinq possibilités *primitives* de modification de l'occupation du sol peuvent apparaître. Il s'agit des cinq modèles représentés ci-contre.



Le modèle indépendant (I): $g_{ij}^{t+\delta t}$ est aléatoire et ne dépend aucunement de g^t_{ij}.

Le modèle fonctionnellement dépendant (II): l'occupation du sol au temps $t+\delta t$ de la cellule ij dépend de l'occupation du sol précédente au même endroit c'est-à-dire que $g_{ij}^{t+\delta t} = F(g^t_{ij})$.

Le modèle historique (III) : l'occupation du sol en ij au temps $t+\delta t$ dépend des occupations du sol antérieures au même endroit. $g_{ij}^{t+\delta t} = F(g^t_{ij} , g_{ij}^{t-\delta t} , g_{ij}^{t-2\delta t} , \dots , g_{ij}^{t-k\delta t})$

Le modèle multi variables (IV) : l'occupation du sol en ij dépend de nombreuses autres variables présentes en ij, et pas seulement de l'occupation du sol. $g_{ij}^{t+\delta t} = F(u^t_{ij} , v^t_{ij}, w^t_{ij}, \dots , z^t_{ij})$. Dans ce cas, l'état pris par chaque cellule est une combinaison de plusieurs autres variables exprimant chacune des réalités différentes.

Le modèle géographique (V): l'occupation du sol en ij au temps $t+\delta t$ dépend non seulement de l'occupation du sol au temps t en ij mais aussi des occupations du sol au temps t en d'autres lieux. $g_{ij}^{t+\delta t} = F(g^t_{ij}, u^t_{i\pm p , j\pm q})$. Dans ce modèle, le concept de voisinage est implicitement pris en compte.

Pour W. Tobler, ces cinq modèles sont évidemment des abstractions simplistes, et c'est certainement en les combinant (notamment, le second et les deux derniers) que l'on procédera à une simulation urbaine plus réaliste.

Figure 1 : *Typologie spatiale des AC d'après Tobler*

La transition se fait d'abord au niveau de chaque cellule, en fonction des règles établies et du type de voisinage considéré, puis au niveau global (à l'échelle du

terrain d'étude). Elle peut être déterministe ou stochastique. En mode déterministe, toutes les configurations possibles à chaque itération sont connues à l'avance. En effet, le nouvel état occupé par chaque lieu spatial à une prochaine itération peut être connu en fonction des règles à appliquer. Le jeu de la vie est un exemple d'automate cellulaire déterministe. En mode stochastique, les règles de transition sont probabilistes. La détermination de l'état d'une cellule au temps t est assujettie à une probabilité p. Si plusieurs cellules satisfont aux conditions pour être choisies, la sélection peut s'opérer au moyen d'un générateur pseudo-aléatoire [12] sur l'ensemble des cellules candidates. Il n'est donc pas possible de prédire de façon exacte, au temps $t - \delta t$, la configuration du système au temps t. La transition est également relative à la gestion du temps : modes synchrone ou asynchrone [13]. Au début de la simulation ($t = 0$) la définition des états initiaux permet d'obtenir la configuration initiale. A chaque itération ($0 < t < t+ \delta t$), les états des cellules sont mis à jour et engendrent une nouvelle configuration.

3 Un modèle d'application : ISLAND

Le modèle ISLAND proposé par Roger White et Guy Engelen [14] est un modèle cellulaire contraint défini sur un espace non homogène. Son objectif est de simuler une dynamique plus régionale que spécifiquement urbaine. Il s'agit d'un modèle contraint dans le sens où la dynamique des états possibles du système est gouvernée par un modèle macro scalaire. Les données d'utilisation du sol proviennent d'une base de données qui est gérée par un système d'information géographique (SIG). Au total, ISLAND est un modèle de simulation cellulaire composé de trois sous modèles.

- Le SIG gère les informations de départ, c'est-à-dire la configuration initiale. Il permet en particulier, de déterminer l'état initial des cellules en adaptant l'information spatiale à la résolution spatiale de l'automate cellulaire. Il permet également de déterminer les surfaces potentielles des différentes formes d'utilisation du sol.
- L'automate cellulaire prend en entrée les diverses occupations du sol considérées comme états accessibles aux cellules. L'évolution du système se fonde alors sur le calcul, pour chaque cellule, d'un vecteur de probabilité matérialisant son degré d'interaction avec les autres cellules. Pour ce faire, entrent en ligne de compte la propension de la cellule à prendre un état donné défini par le SIG, l'effet de son voisinage et une perturbation aléatoire. Ce vecteur noté P de dimension n (c'est-à-dire le nombre d'états possibles) est exprimé sous la forme $P = SN+\varepsilon$ où :

ε est un facteur d'ajustement ;

S est un vecteur de dimension n donnant la propension des états à être occupés par une cellule quelconque. En fait c'est le potentiel d'une cellule à occuper un certain état ;

N est une matrice diagonale de dimension n x n donnant sur la diagonale l'effet de

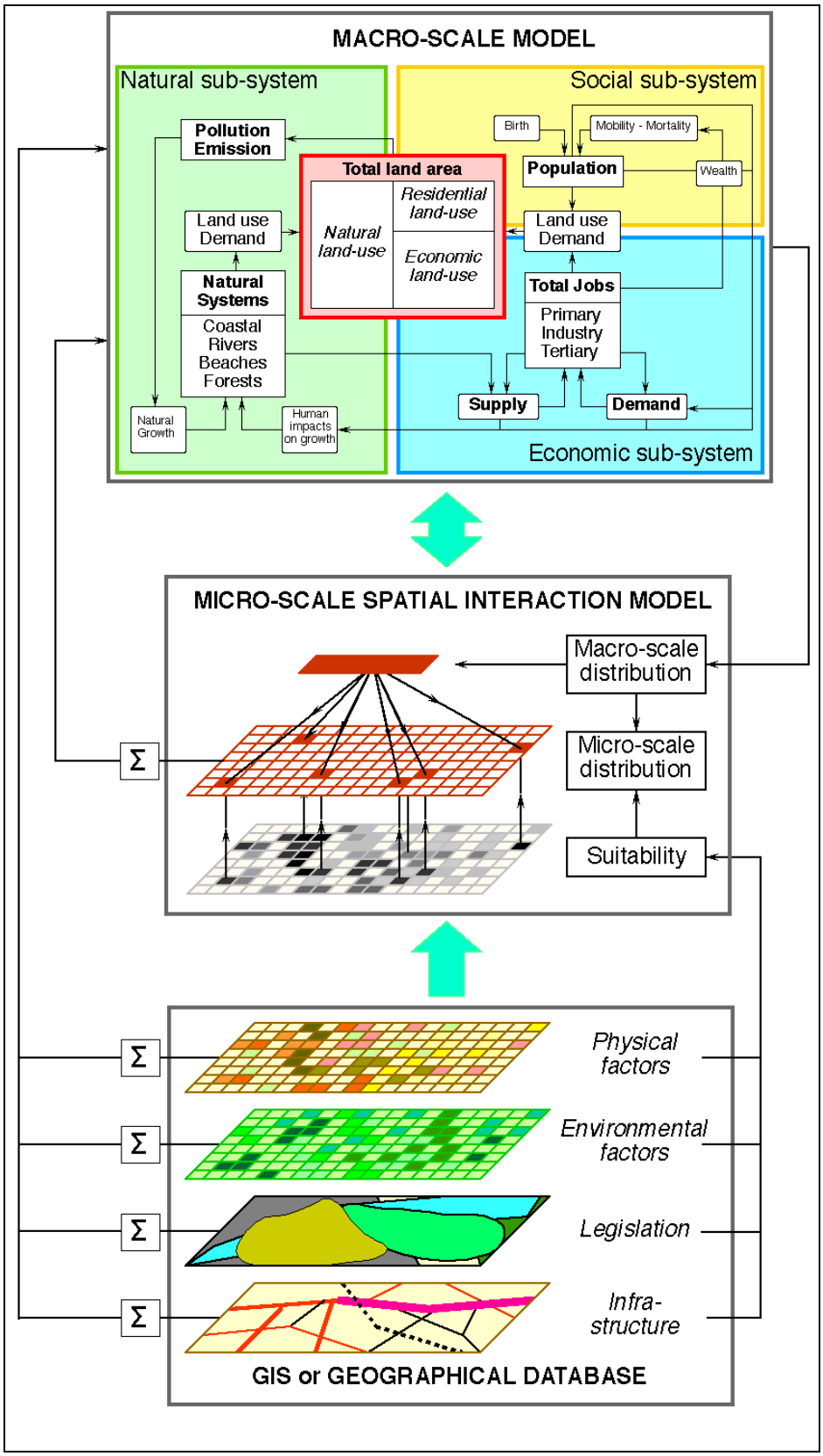


Figure 2 : *Vue d'ensemble du modèle ISLAND* (Extrait de [14])

voisinage pour chacun des états possibles dans une cellule donnée selon la fonction $N_{ii} = \sum_d \sum_k (w_{z,y,d})(I_{d,k})$ avec :

Nii l'effet de voisinage pour l'état i ;
$W_{z,y,d}$ un paramètre qui spécifie le poids des cellules du voisinage en fonction de leur état *y* et de leur distance *d* à la cellule centrale ;
$I_{d,k} = 1$ si la cellule *k*, à une distance *d*, occupe l'état *y*, sinon $I_{d,k} = 0$.
- Le sous modèle macro scalaire permet de déterminer les conditions régionales de la demande exprimant les états possibles du système. Ce sous modèle intègre trois autres modules dont l'utilisation combinée varie en fonction des régions d'application. Il s'agit d'un module environnemental, d'un module démographique et d'un module économique. Si par le biais du module environnemental l'utilisateur précise les hypothèses de modélisation concernant les changements climatiques, le taux de croissance de la population est donné par le module démographique en fonction des migrations et de la mortalité. Le module économique permet de relier les principaux secteurs d'activités en termes d'entrées et de sorties (input/output).
Les auteurs ont expliqué dans un de leurs papiers [Engelen, et al., 1995] que « *[…] la relative facilité de calibration de ce type de modèle permet d'engendrer des configurations spatiales proches de la réalité*». La vue d'ensemble de l'architecture du modèle ISLAND est illustrée à la figure 2.

4 voisinages et contexte spatial

Dans cette section nous montrerons dans un premier temps comment se formalise la dimension spatiale d'une problématique à partir de la définition classique du voisinage d'un lieu ainsi que sa résolution spatiale. En suite une réflexion autour du contexte spatial sera amorcée par le biais des interactions intra et inter échelles en revenant sur la typologie de Tobler et les voisinages dynamiques. Enfin nous discuterons de quelques pistes de modélisation des contextes spatiaux par le biais des voisinages adaptatifs dans les applications multi scalaires.

4.1 Voisinages classiques et résolution spatiale

Le caractère spatial des AC ne provient pas d'eux-mêmes mais de la façon éminemment géographique de saisir leurs fonctions de transition. Celui-ci commence par la définition du voisinage d'un lieu mais aussi la résolution spatiale de tous les lieux. Deux lieux sont dits voisins s'il existe une fonction de transition déterminant l'influence directe de l'un d'entre eux sur l'autre, à n'importe quel moment possible de la vie du système. Le voisinage d'un lieu est ainsi à comprendre comme un ensemble d'autres lieux pouvant potentiellement entrer en interaction avec celui-ci. Potentiellement, dans le sens où ces interactions peuvent intervenir à n'importe quel moment de la simulation. En effet, c'est à L'espace cellulaire correspondant à la zone d'étude qu'est superposé un carroyage. Ce dernier permet de subdiviser le terrain d'étude en de petites mailles appelées "*cellules*" selon une résolution spatiale adéquate relativement à la thématique

étudiée et le niveau de précision voulu. La résolution spatiale désigne les dimensions c'est-à-dire la longueur et la largeur ou le côté de chaque lieu spatial selon que la forme géométrique des mailles est un rectangle ou un carré. Plus la résolution spatiale est fine, meilleure est la précision des analyses. Le voisinage est donc entièrement déterminé par la fonction de transition et par l'ensemble des lieux que celle-ci met (ou ne met pas) en lien l'un avec l'autre. Définir un lieu dans un modèle d'AC revient donc à définir un ensemble d'interactions entre celui-ci et d'autres lieux spatiaux au sein de l'espace cellulaire par le biais duquel les relations topologiques entre lieux sont également possibles. Et c'est grâce à cette topologie qu'un lieu peut être formellement identifié comme le voisin d'un autre lieu. La définition du voisinage varie donc en fonction de la problématique prise en compte par le modèle d'AC. En effet, ce sont les concepts de proximité spatiale [15] et de contiguïté spatiale [16] en géographie qui sont pris en compte au travers du concept de voisinage dans les AC. Pour un lieu spatial donné, le voisinage permet de définir avec précision l'ensemble des autres lieux avec lesquelles il peut entrer en interaction. Cette précision s'obtient par le biais de la topologie dans un certain rayonnage (Figure 3) autour du lieu considéré.

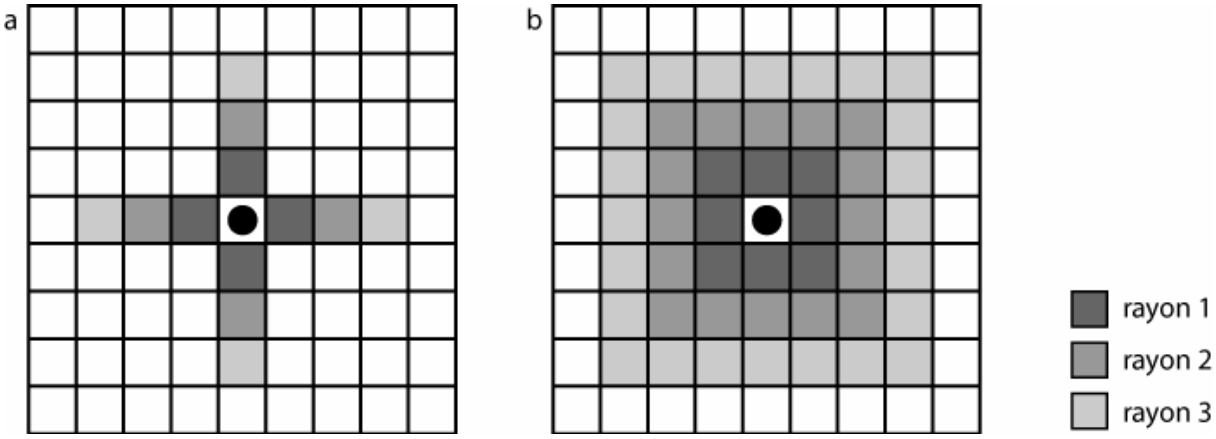


Figure 3 : *Voisinage de Von Neumann (a) et de Moore (b) au rayon 1, 2 et 3*

Il existe classiquement cinq types de voisinages : voisinage de Von Neumann (a), voisinage de Moore (b), voisinage de Von Neumann déplacé (c), voisinage de Moore Von Neumann (d) et le voisinage en H (e) tels que présentés

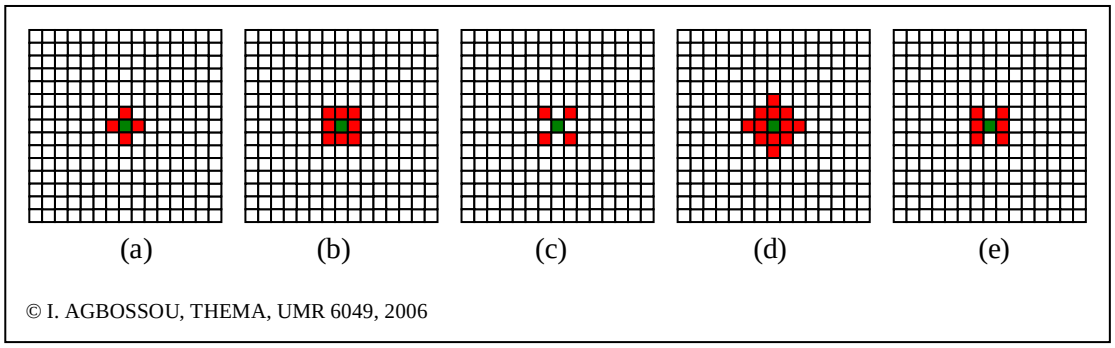


Figure 4 : *Typologie des voisinages classiques*

Les deux voisinages de bases les plus significatifs sont ceux de Moore et de Von Neumann. Les autres sont obtenus par des combinaisons de ces derniers. Pour un lieu spatial donné, le voisinage de Von Neumann (a) considère ses voisins comme étant l'ensemble des autres lieux spatiaux de premier rang situés de part et d'autres de chaque côté (Nord, Sud, Est et Ouest). Le voisinage de Moore (b) considère les lieux de premier rang situées de part et d'autre des quatre côtés et sommets du lieu cible (il s'agit du voisinage de Von Neumann complété par les lieux situés au Nord-Est, Nord-Ouest, Sud-Est et Sud-Ouest).
En respect du "principe de cohérence de voisinage" qui s'énonce comme suit : « *Dans un système de cellules interactives, l'état réalisé dans une cellule tend à s'imposer aux cellules du voisinage.* » [2, op. cit.], le voisinage de Moore se prête mieux aux modélisations urbaines. En effet, lorsqu'un lieu l occupe un état e_i, il interagira avec les autres lieux de son voisinage V de façon à augmenter la probabilité pour que ceux-ci occupent le même état e_i. Inversement, chaque lieu l' du voisinage V interagira de la même façon avec l en tendant à imposer son propre état à ce dernier.

4.2 Contraintes multiscalaires et structures spatiales

L'une des difficultés majeures que pose la conception d'un modèle cellulaire est celui de la prise en compte des contraintes contextuelles multiscalaires et structurelles; contraintes de la politique publique, des organismes centrés, des contextes culturels. En effet, les phénomènes géographiques ne se manifestent pas d'individus en individus à une seule et même échelle spatiale, structurelle et fonctionnelle (nous faisons ici référence aux différentes couches thématiques des applications géographiques des modèles cellulaires).
De plus en plus de travaux d'étude ou de recherche s'intéressent aussi au lien étroit qui relie la morphologie de la ville et son bon fonctionnement. La thématique des déplacements urbains est évidemment le premier sujet d'intérêt dans ce domaine, d'où les nombreux travaux publiés ces dernières années sur le rôle des déplacements urbains sur la structuration de la ville [17 ; 18]. A l'inverse on a également effectué des études sur le rôle de la morphologie sur la structuration des déplacements urbains : la variabilité de l'offre selon la morphologie [19], le rôle de l'organisation morphofonctionnelle des réseaux routiers sur les préférences de mode de déplacement [20 ; 21] et notamment sur la mobilité piétonne [22]. Par ailleurs, Hillier et Hanson ont développé dès 1984 une conceptualisation de la prise en compte d'un lien général entre la société urbaine et son espace avec la définition de la « *space syntax* ». Dans ce cadre, ils ont développé une théorisation de l'espace urbain comme un nouvel ordre spatial reposant exclusivement sur un processus aléatoire cadré par des règles d'urbanisme. Ils ont également développé un outil d'analyse et de représentation de la logique sociale de l'espace (*social logic of space*) et de la logique spatiale des sociétés (*spatial logic of society*) inspiré de la théorie des graphes.

D’autres auteurs enfin [23 ; 24] ont étudié le rôle joué par les aménités recherchées par la population ou les activités, et offertes par la morphologie urbaine dans la structuration fractale des villes. La forme fractale des villes, et de ses quartiers, résulterait d’une optimisation de la couverture de l’espace par les formes bâties permettant de favoriser la fonction exercée localement. Dans le cas de l’habitat par exemple, cette optimisation répond à la fois à la contrainte de centralité, qui valorise l’accessibilité, et au désir de se trouver aussi en périphérie urbaine, à proximité de la nature. De nombreuses approches ont ainsi contribué à la redécouverte que la dynamique du système urbain dépendait de la structure morphologique actuelle de la ville et engendrait sa structure future par autopoïèse. 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.

En complément 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 [25], une étape essentielle nous semble aujourd’hui encore utile. Les relations de voisinage entre unités géographiques sont en effet le plus souvent déterminées selon des critères topologiques (contiguïté) ou métriques (distance euclidienne) reposant implicitement sur une hypothèse de stationnarité et d’isotropie, deux options qui traduisent peu ou mal les différenciations spatiales induites par les réseaux et les modes de transport [26]. Dans cette perspective, nous proposons une amorce de réflexion pour la formalisation de voisinages dynamiquement adaptatifs pour une meilleure prise en compte de la réalité du contexte spatial.

4.3 Eléments de réflexion autour du contexte spatial

Tout modèle d’AC ne consiste pas nécessairement en une matrice orthogonale. D'autres formes régulières, comme des triangles ou des hexagones, peuvent également être utilisées. À titre d'exemple, le premier modèle SIMPOP [29] fut construit sur la base d'un AC inscrit au sein d'un espace cellulaire à découpage hexagonal. D'autres découpages irréguliers peuvent s’avérer incontournables. Tobler avait déjà évoqué le problème que pose l'irrégularité de maillages administratifs à une modélisation cellulaire. Engelen utilise néanmoins tout de même des unités spatiales déterminées selon le maillage administratif dans son modèle de l'occupation du sol ISLAND. Le problème n’est que d’ordre technique. La difficulté principale des espaces de ce type est de leur apposer un système de coordonnées permettant à la fois d'attribuer à chaque lieu un identificateur spatial unique et de faire en sorte que les relations de voisinage dont procède l'espace aient une expression formelle la plus compréhensible, du point de vue intuitif. La question qui se pose dans ce cas est de savoir quels sont les voisins d'un lieu limitrophe. Cette question peut obtenir essentiellement deux

réponses distinctes, formulées toutes en termes de la nature des limites d'une matrice cellulaire: ces limites peuvent être absentes ou closes. Le cas de limites closes est le plus simple parmi les espaces limités mais n'est applicable que lorsque les règles de transition sont de nature totalistique. C'est ainsi que cela se présente, par exemple, dans le Jeu de la Vie. Dans ce cas, les lieux limitrophes ont simplement moins de voisins. En géographie, les frontières closes se présentent lorsqu'un phénomène géographique est circonscrit par une discontinuité spatiale infranchissable. Cela est le cas d'une île physique mais peut également se présenter sous d'autres formes. Jusqu'à la chute du Mur, par exemple, Berlin-Ouest représentait une île du point du mouvement des populations ou de la possible extension de l'espace habité de la ville.
Un espace aux limites absentes est soit un espace infini, soit un espace fini mais illimité, le deuxième cas étant justement celui du globe terrestre du point de vue de sa surface. Dans un AC effectif, c'est-à-dire, simulé par un ordinateur, tout espace cellulaire infini est potentiellement ingérable car le phénomène simulé dépasse tôt ou tard la capacité de calcul de la machine – cela à moins que le phénomène ne s'autolimite dans l'espace.

En conséquence de tout ce qui précède, pour une prise en compte effective du contexte spatial dans les applications géographiques des automates cellulaires, il convient de revenir sur l'hypothèse fondamentale de stationnarité [26, op. cit. ; 27 ; 28a ; 28b] :
- les unités spatiales sont réparties uniformément sur l'ensemble du domaine ;
- les relations de voisinage sont strictement identiques pour toutes les unités spatiales ;
- les fonctions de transition sont elles mêmes le plus souvent stationnaires, s'appliquant de manière équivalente en tout point de l'espace cellulaire.
Le contexte spatial d'une cellule devra donc être l'ensemble des lieux ayant une quelconque influence sur la cellule. Il s'agit donc d'un voisinage étendu. Il s'en suit que chaque cellule susceptible d'évoluer dans le temps dispose d'un voisinage spécifique. Cette réalité est déjà prise en compte dans certains travaux [26, op. cit. ; 27 ; 28a ; 28b] pour rendre compte de toute la complexité des relations spatiales dans la ville. Dans le modèle REMUS [26, op. cit.], cette dynamique des relations permet aux cellules de se regrouper pour remplir une fonction donnée, au-delà de leur voisinage immédiat, à la manière des neurones. Les relations de voisinage sont donc fondamentalement fonctionnelles et non simplement géométriques. L'identification des lieux appartenant au contexte spatial d'une cellule se fait par le biais du modèle de potentiel [7, op. cit.].

Ainsi, en nous appuyant sur les travaux déjà cités et ceux d'Olivier Michel [30] autour du calcul spatial en langage fonctionnel, nous proposerons une formalisation aboutie (ce travail est actuellement en cours d'élaboration) du contexte spatial comme nous l'avons définie, dans les automates cellulaires non

stationnaires où les fonctions de transition seront plus dynamiques et contextuelles. Chaque pourra changer de forme et de résolution spatiale de façon contextuelle (changement de niveau d'organisation et/ou d'échelle spatiale) pour une représentation spatiale proche de la réalité morphologique des zones d'étude.

5 Conclusion

L'ensemble des réflexions épistémologiques et méthodologiques exposées dans ce papier constituent un préambule à une formalisation du contexte spatial (voisinages étendus et adaptatifs) dans les automates cellulaires non stationnaires tout en apportant des réponses aux récurrentes. Comment rendre compte de la proximité thématique de lieux dont l'état englobe à chaque fois plus d'une centaine de variables? Comment représenter le voisinage d'un lieu alors que la forme de la fonction de transition revoie à un espace à plusieurs dimensions, comprenant des phénomènes de communication, de transport, d'échange économique etc.? Comment rendre compte des lieux implicites, de leur nombre, de leur nature?

6 Références

[1] W. Tobler, "Cellular geography".
http://www.geog.ucsb.edu/~tobler/publications/pdf_docs/geog_analysis/CellularGeog.pdf.
Reidel Pub, Dordrecht, Holland (1979)

[2] A. Langlois, M. Phipps, "Automates cellulaires : application à la simulation urbaine". Editions Hermès, Paris (1997)

[3] A. Dauphiné, "Les théories de la complexité chez les géographes", Anthropos, Paris, (2003).

[4] N. Cocu, G. Caruso, "Modéliser la complexité géographique. Vers une approche progressive Automates cellulaires-Systèmes Multi-Agents", Document de travail, (2002).
http://www.geo.ucl.ac.be/IMAGES/Caruso_Cocu_WP.pdf

[5] I. Agbossou, "VisualSimores: un outil de simulation multi-agents de la dynamique urbaine à base d'automates cellulaires. Méthodologie de conception, algorithmes et application. Communication à la 2ème Rencontre de doctorants en SHS sur la modélisation des dynamiques spatiales, décembre 2007, Avignon, (2006).

[6] I. Agbossou, "Modélisation et simulation multi agents de la dynamique urbaine. Application à la mobilité résidentielle". Thèse de doctorat de géographie. Université de Franche-Comté. Besançon, (2007). http://artur.univ-fcomte.fr/SLHS/GEO/these/agbossou.pdf

[7] J-P. Antoni. Modélisation de la dynamique de l'étalement urbain. Aspects conceptuels et gestionnaires. Application à Belfort. Thèse de doctorat de géographie. Université Louis Pasteur de Strasbourg I. Strasbourg, (2003).
http://eprints-scd-ulp.u-strasbg.fr :8080/10/10/htm/index-frmas.html

[8] M. Batty, "Cities and Complexity. Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals", The MIT Press, (2005).

[9] Y. Guermond, "Des modèles classiques à la modélisation incrémentale. In Modélisations en géographie : déterminismes et complexités", Editions Hermès, Paris, (2005).

[10] P. Langlois, “Complexité et systèmes spatiaux. In Modélisations en géographie, déterminismes et complexités”, Editions Hermès, Paris (2005).
[11] B. Marchal, “Automate”In: AUROUX S. (dir.) Encyclopédie philosophique universelle: Vol. II Les notions philosophiques, PUF, Paris (1990).
[12] G. Fleury, P. Lacomme, A. Tanguy, “Simulation à évènements discrets. Modèles déterministes et stochastiques. Exemples d’applications implémentés en Delphi et en C++”, Editions Eyrolles, Paris, (2007).
[13] I. Benenson, Paul Torrens, “Geosimulation: Automata-based modeling of urban phenomena”, Edition Wiley, (2004).
[14] R. White, G. Engelen, “High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems”, in Computers, Environment and Urban Systems n°24, (2000).
[15] D. Pumain, T. Saint-Julien, “Les interactions spatiales, Volume 2 : interactions”, Editions Armand Colin, Collection Cursus, Paris, (2001).
[16] M. Phipps, “Dynamical Behavior of Cellular Automata under the Constraint of Neighborhood Coherence”, In Geographical Analysis n°21, (1989).
[17] Dupuy Gabriel, “The automobile system : a territorial adapter”, Flux, n°21, 1995, p. 21-36
[18] Frankhauser Pierre, “Aspects fractals des structures urbaines”, *L'Espace géographique*, n°1/91, 1991, p. 45-70
[19] Gourdon Jean-Loup, “De la voierie à la rue : pour habiter le temps”, Urbanisme, n°292, 1997, p. 20-24
[20] Genre-Grandpierre Cyril, “Laisser leur chance aux modes non mécanisés par l’aménagement des réseaux routiers”, *Actes des V° rencontres Théoquant*, fév. 2001, 12 p.
[21] A. Piombini, J-C Foltête, “Vers une définition des ambiances urbaines favorables à la mobilité pédestre”, 42ème congrès de l’AQTR, Montréal, 2007.
[22] Genre-Grandpierre Cyril et Foltête Jean-Christophe, “Morphologie urbaine et mobilité en marche à pied”, Cybergéo, art 248, 2003, 19 p.
[23] Batty Michael, Longley Paul , “The fractal simulation of urban structure”, *Environment and Planninga*, vol.18, n°9,1986, p. 1143-1179
[24] De Keersmaecker Marie-Laurence, Frankhauser Pierre, Thomas Isabelle, “Using fractal dimensions for characterizing intra-urban diversity : the exemple of Brussels”, *Geographical analysis*, vol 35, n° 4, 2003, p. 310-328
[25] Ménard, A, Filotas, E Marceau D., “Automates cellulaires et complexité : perspectives géographiques”, *Documents de l’IAG, 2004*, : http://www.iag.asso.fr/
[26] Dominique Badariotti, Arnaud Banos et Diego Moreno, “Conception d’un automate cellulaire non stationnaire à base de graphe pour modéliser la structure spatiale urbaine: le modèle Remus”, *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Dossiers, Sélection des meilleurs articles de SAGEO 2006, document 403, mis en ligne le 03 octobre 2007. URL : http://www.cybergeo.eu/index10993.html
[27] O’Sullivan D., “*Graph-based cellular automata models of urban spatial processes”*, Thèse de doctorat, University College London, London, 2000.
[28a] 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.
[28b] O’Sullivan D., “Graph-cellular automata : a generalised discrete urban and regional model”, *Geographical Analysis*, vol.33, n°1, 2001.
[29] S. Bura, F. Guérin-Pace, H. Mathian, D. Pumain, L. Sanders, “Multi-Agents Systems and the Dynamics of a Settlement System”, In Simulation Societies Symposium, Siena, (1993).
[30] Antoine Spicher, Olivier Michel and Jean-Louis Giavitto. “*Spatial Computing as Intensional Data Parallelism”*. Third IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems - Spatial Computing Workshop, 2009