

La modélisation des systèmes complexes intérêts des automates cellulaires

2.1. Modèles dynamiques et simulations des systèmes complexes

C'est parce qu'il est difficile, voire impossible, de faire état de tous les modèles dynamiques existants et traitant de l'évolution des phénomènes que des classifications sont proposées. On observe en effet des modèles basés sur une approche dite « dure » ou « approximative », (Corgne, 2004), d'autres s'appuyant sur des domaines d'application ou encore sur la temporalité (Lambin, 2000). Certaines classifications distinguent des modèles à base unique et des modèles à bases organisationnelles multiples (Cauvin *et al.*, 2008). Ces distinctions et/ou classifications visent à offrir une meilleure connaissance des modèles existants. Toutefois, il faut admettre qu'il n'est pas très aisé de se retrouver dans ces classifications d'autant plus que les modèles proposés ces dernières années sont des modèles hybrides difficiles à classer et qui bénéficient d'une grande avancée technologique ainsi que d'informations de plus en plus précises (Gaucherel *et al.*, 2006). Les types de modèles présentés dans les paragraphes suivants sont parmi les plus utilisés aujourd'hui en géographie.

2.1.1. Les réseaux neuronaux

Les réseaux neuronaux ou *Artificial Neural Networks* sont utilisés pour la représentation dynamique de phénomènes spatiaux issus de travaux biologiques. Les modèles issus du paradigme des réseaux de neurones sont classés comme étant des modèles d'évolution. Principalement axés sur les interconnexions entre les nœuds/neurones, les réseaux de neurones sont également utilisés pour déterminer la morphologie des objets/phénomènes étudiés. Ils ont largement inspiré la géographie mais aussi d'autres disciplines. En géographie des transports (L'Hostis, 1997 ; Chapelon, 1997, 2006 ; Dupuy, 1975, Bavoux *et al.*, 2005 etc.) ils permettent notamment, quand ils sont combinés avec la théorie des graphes, de détecter les formes de réseaux qui structurent les territoires. En télédétection, ils sont utilisés à des fins de localisation des changements détectés sur les territoires et de classification des types d'occupation et d'utilisation des sols (Foody *et al.*, 1999, 2002). On retrouve également leur application dans le domaine des infrastructures critiques telles que les réseaux électriques ou de gaz, ou encore dans le cas des liens du réseau internet.

2.2.2. Les modèles mathématiques et statistiques

Dans le cas précis d'un modèle mathématique, la simulation repose sur une ou plusieurs équations qui calculent le niveau de précision des changements observés (Lambin, 1994 ; Sklar *et al.*, 1991). Les modèles mathématiques sont généralement combinés avec d'autres techniques modélisatrices. C'est le cas des modèles « classiques » à quatre étapes couramment utilisés par les bureaux d'étude et qui sont largement appliqués dans le cadre de la prévision de trafic sur de nouvelles infrastructures, de la mobilité et du choix modal

(Bonnel, 2004). Des approches comme les analyses multivariées, les régressions multiples, etc., sont la base des modèles statistiques. Certains de ces modèles sont également désignés sous le nom de modèles stochastiques (Monte-Carlo Simulation) dans la mesure où ils font appel à des tirages aléatoires pour saisir l'évolution des phénomènes étudiés.

2.1.3. Notre choix, les modèles basés sur les Automates Cellulaires

Les automates cellulaires sont des modèles de type « individus centrés », ces « individus » étant désignés sous le terme de « cellules » dont le fonctionnement/comportement repose sur des relations de voisinages (Tobler, 1979). La différence entre système multiagents (SMA) et automates cellulaires (AC) est simple. Les premiers sont plus pertinents pour analyser et simuler le comportement d'un individu ou d'un groupe dans un territoire donné et à un temps donné, alors que les seconds sont plus pertinents pour simuler et expliciter la manière dont les systèmes spatiaux s'organisent peu à peu et se structurent dans le temps. Par ailleurs, la faiblesse des modèles basés sur automates cellulaires réside dans la difficile prise en compte des interactions sociales (individus et groupes) et/ou politiques d'un système (Tobler, 1979 ; Alcamo, 1994) tandis que la faiblesse des SMA se situe au niveau de leur capacité à considérer les interactions spatiales (relations de voisinages entre différents objets situés dans l'espace géographique). Les SMA sont *constitués d'un ensemble d'agents autonomes et indépendants en interaction, qui coordonnent leurs actions dans un environnement et forment une organisation artificielle* (Bonnefoy, 2001). Les SMA sont essentiellement tournés vers l'analyse de comportements individuels, ou d'un groupe au sein d'un système complexe donné. Ils permettent, tout comme les automates cellulaires d'ailleurs, de simuler des processus de diffusion d'un phénomène au sein du système lui-même et de mettre en évidence un fait émergent. Dans tous les cas, c'est la problématique et l'entrée choisies par le chercheur qui doit déterminer le type de modèle utilisé. Pour exemple, AC vs SMA ou SMA vs AC ? C'est un choix méthodologique qui s'impose car si l'approche préconisée est une entrée SMA vs AC, cela veut dire que l'on considère au préalable que c'est le comportement des agents dans l'espace qui détermine l'organisation et le fonctionnement de l'aire d'étude. En revanche, si l'on considère une approche AC vs SMA cela sous-entend que c'est la structure de l'espace étudié qui détermine et explique le comportement complexe des agents dans l'espace.

Tous les modèles ont des limites, ce qui a favorisé l'émergence des modèles dits hybrides. Les modèles hybrides consistent à effectuer un couplage de modèles (mathématiques, statistiques, les réseaux neuronaux, les systèmes multi-agents et/ou automates cellulaires) dans l'objectif de faire ressortir la structure des systèmes complexes étudiés grâce à « une intelligente combinaison » de propriétés et paramètres provenant d'autres modèles (Li et Reynolds, 1997).

Aussi, le géographe est tenu de garder en mémoire que le modèle, même s'il a évolué depuis J.H. Von Thünen, doit rester cet outil de la prévision, de la prospective et de l'anticipation des phénomènes évolutifs, certes devenu incontournable, mais qui ne peut se

substituer à d'autres préalables comme par exemple le diagnostic spatial transfrontalier sans lesquels *l'outil modèle n'est qu'un leurre ne pouvant conduire qu'à de piètres résultats* car, il n'y a pas de modèle sans objectifs.

2.2 Philosophie et structure des modèles basés sur les automates cellulaires

En 1987, Couclelis perçoit l'importance des automates cellulaires pour la science en général et pour la géographie en particulier, et ceci dans le cadre de la prédiction des systèmes complexes. En ces termes : *For the geographer, cellular automata have the added attraction of being intrinsically spatial models of complex process. Because of their extreme simplicity (naivety, one might say), these are not the kind of constructs that can be used to replicate directly the evolution of real –world process* (Couclelis, 1987), l'auteur invite sans ambiguïté tout géographe en situation de démarche prospective, comme c'est le cas dans cette recherche, à saisir le message suivant : les automates cellulaires sont des outils capables d'appréhender la complexité des systèmes à laquelle le géographe est habituellement confronté.

2.2.1. Historique des automates cellulaires : caractéristiques élémentaires et définitions

À la question « qu'est-ce qu'un automate cellulaire ? » nous pouvons commencer par apporter des réponses en nous aidant de sources faisant état de l'historique de ces outils. Les noms d'Allan Turing (1952), et en particulier celui de John Von Neumann (1966), du fait de ses illustres travaux sur les systèmes d'*autoreproduction*/d'*autoréplication*/self reproducible affleurent systématiquement lorsque l'on évoque la notion d'automates cellulaires. Tous deux apparaissent comme les pionniers de la notion d'automates cellulaires, pourtant il faut remonter en 1940 pour découvrir que peu avant Von Neumann (ou parallèlement³²), un certain Stanislaw Ulam, mathématicien, tentait déjà de modéliser sur une grille unidimensionnelle de cellules, un phénomène de croissance. Ces deux précurseurs combinèrent leurs travaux dans les années 1950-1960 (Ulam, 1962) pour aboutir à *l'autoreproduction du vivant* à partir de règles d'évolution. Le système cellulaire était né.

Cependant, il faudra attendre la fin des années 1960 (entre 1967 et 1970) avec les travaux d'un mathématicien de Cambridge en Angleterre, nommé John Conway, pour assister à l'émergence d'un automate cellulaire à deux dimensions et deux états, présenté sous le nom du *Game of Life*, le « Jeu de la Vie » (Conway, 1970). C'est à partir des travaux de John Conway que les automates cellulaires vont se diffuser parmi la communauté scientifique. Dès lors, toute la philosophie et la structure de base des automates cellulaires vont reposer sur le concept du « Jeu de la Vie » de John Conway. « Le Jeu de la Vie » est gouverné par quelques règles simples qui peuvent se résumer de la manière suivante : il existe des cellules vivantes et des cellules mortes. Les cellules mortes peuvent revivre si et seulement si elles ont pour

³² Les récits historiques n'ont jamais vraiment été très clairs sur cette chronologie.

voisines trois cellules vivantes. De même, les cellules vivantes restent en vie si elles ont pour voisines deux ou trois cellules vivantes (cf. figure 2.1).

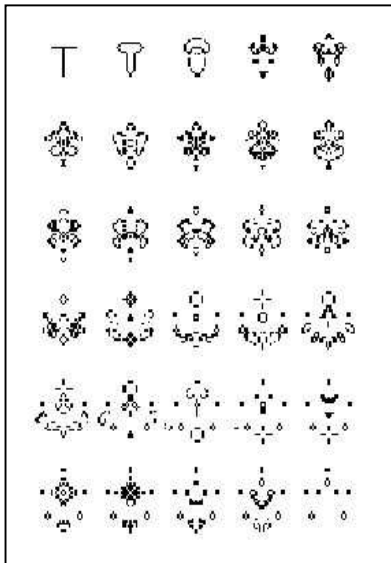


Figure 2.1 : “Game of Life”
Source : Barredo et al. 2003

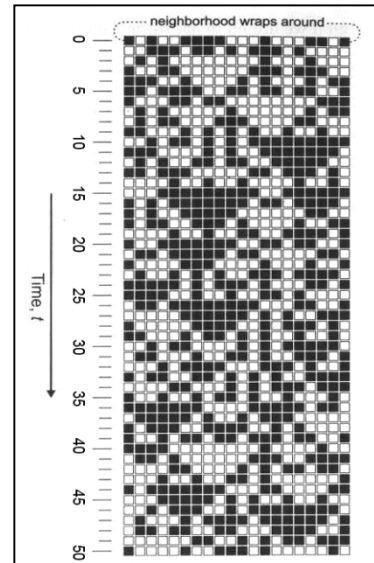


Figure 2.2 : Complexité des automates
Source : O’sullivan et Unwin, 2003

De cette règle simple peuvent émerger des comportements complexes comme l’indique Stephen Wolfram dans ses travaux, (Wolfram, 1984), où l’auteur démontre la capacité des automates cellulaires à expliciter l’état d’un phénomène dans son comportement le plus simple comme dans son comportement le plus complexe. Cette idée du comportement complexe doit être reproduite par un automate cellulaire gouverné par les règles du Jeu de la Vie de Conway comme l’illustrent les travaux de O’sullivan et Unwin (2003) indiqués par la figure 2.2. Dans ce cas d’automates cellulaires le plus simple, c’est-à-dire avec une seule dimension, les auteurs mettent en évidence l’évolution de l’état des cellules (ici de couleur noire ou blanche) dans le temps. Cette évolution dépend des relations de voisinage que chaque cellule entretient avec la/les cellules voisines de gauche et de droite « (...) Each cell’s evolution is affected by its own state and the state of its immediate neighbours to the left and right (...) the rules for this automaton is that cells with an odd number of black neighbours (conting themselves), will be black at the next time step; otherwise, they are white » (O’sullivan et Unwin, 2003). De ces comportements évolutifs des cellules fondés par les relations de voisinage, de nouvelles formes voient le jour (se traduisant ici par des triangles) : « (...) The automaton rapidly develops unexpectedly rich patterns, with alternating longish sequence and exclusively black or white cells, visible as triangles in this view, as they appear and then collapse » (O’sullivan et Unwin, 2003). Ainsi, le voisinage forme une « entité », un « seul corps » ou encore un seul « système » constitué de règles de transition invariantes dans l’espace et dans le temps, et dont dépendent la survie et l’évolution dans l’espace-temps de chaque cellule prise individuellement, et dans sa relation la plus complexe avec ses voisines.

La capacité des automates cellulaires à mettre en évidence à partir de règles simples la complexité des systèmes, est à mettre en relation avec la *non linéarité* des processus structurant un système qui s'exprime par l'équation différentielle suivante :

$$X_{t+1} = f(X_t)$$

Dans cette équation, (X) est une variable donnée qui est dépendante d'elle-même à l'instant précédent, (t+1) est la valeur temps à l'instant immédiatement après t. Cette équation définit un rapport non linéaire basique. Les équations non linéaires, entièrement déterministes et simples, produisent pourtant des comportements dynamiques à partir de points stables et de situations/régimes chaotiques (cf. figure 2.3) : *These equations, although fully deterministic, can produce a very dynamic behaviour, from stable points and limit cycles to chaotic regimes* (Wolfram, 1984). Aussi, grâce à la *non linéarité* dans son paramétrage et du fait que le temps y est discret, il n'est pas étonnant que les automates cellulaires se présentent comme des outils pertinents pour reproduire la réalité et simuler la dynamique spatio-temporelle d'un phénomène donné.

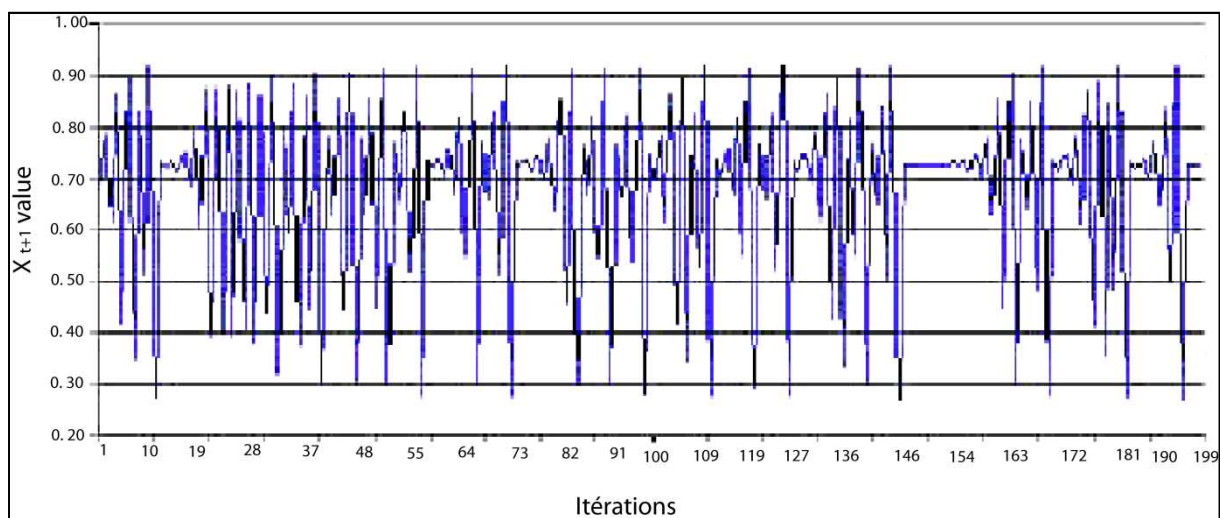


Figure 2.3 : A non linear phenomenon and complexity

Very simple non linear differential equations may produce very complex behaviours. In this case, the equation $X_{t+1} = aX_t(1 - X_t)$ produces a serie of values of X that might appears as indistinguishable from the simple function of a random process. The behaviour of this function can be defined as "chaotic" in many respects

Source : Barredo *et al.*, 2003

Par ailleurs, dans le cadre de la compréhension du fonctionnement des automates cellulaires au sein d'un espace cellulaire déterminé, autrement dit à l'intérieur de leur environnement relationnel, différentes configurations de voisinage peuvent être distinguées.

Les configurations de voisinage dépendent des relations de voisinage variables, des conditions initiales et de l'état du système. Six types de configurations locales de voisinage peuvent être énumérés (cf. figure 2.4). Ainsi, en examinant ces six configurations (cf. figure 2.4), on peut distinguer : le voisinage local de Von Neumann [cf. figure 2.4 (a), et figure 2.4 (c)] ; dans ce cas de figure se trouve le voisinage local nommé « Asymmetric » (cf. figure 2.4 (d)). Le voisinage local de Von Neumann est caractérisé par une structure incomplète illustrée par la couleur blanche à l'intérieur des formes géométriques. Le voisinage local nommé « "H" neighborhood » (cf. figure 2.4 (f)), présente des similitudes avec celui de Von Neumann - même s'il n'est pas de celui-ci - du fait de sa structure incomplète. En revanche, le voisinage local de Moore (cf. figure 2.4 (b)) présente une structure beaucoup plus complète.

La combinaison du voisinage local de Von Neumann et de celui de Moore donne naissance au troisième groupe nommé « Moore Von Neumann vs MvN » (cf. figure 2.4 (e)) ; ce dernier favorise plus largement les processus de diffusion d'un phénomène que lorsque chaque groupe est pris isolément, du fait qu'il offre la possibilité pour chaque cellule d'avoir des relations de voisinage beaucoup plus importantes. Chaque configuration (cf. figure 2.4) et/ou organisation locale de voisinage génère des comportements différents en produisant des formes différentes selon le nombre de cellules présentes et l'importance du nombre de voisinage et donc des interactions et interrelations existantes.

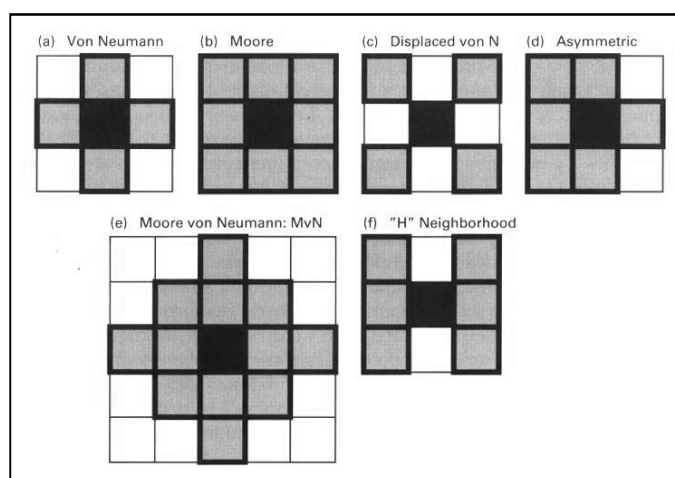


Figure 2.4 : Local neighborhoods

Source : Batty, 2005, p.77

À l'examen des règles d'évolution qui gouvernent les automates cellulaires et au regard de leurs comportements complexes au sein de l'environnement relationnel qui les caractérise, quelles définitions peut-on et doit-on donner aux automates cellulaires ? Pour Garnett P. Williams, les automates cellulaires sont : *A mathematical construction consisting of a system of entities, called cells, whose temporal evolution is governed by a set of rules and whose behaviour over time becomes, or at least may appear, highly complex.* (Williams, 1997). Avant Williams, André Dauphiné, parle des automates cellulaires comme d'une autre catégorie de modèle de particules. (...) Ils produisent des formes spatiales complexes à partir

de règles simples. (Dauphiné, 1987). D'une manière générale, les automates cellulaires sont définis (Couclelis, 1985 ; Phipps, 1989 ; Langlois, 1997) comme étant des outils informatiques et/ou des modèles de calcul qui se déploient dans un espace et un temps discret. Bien plus encore, les automates cellulaires sont considérés comme étant *des modèles à auto-organisation, à architecture distribuée et à implémentation en parallèle dans lesquels l'espace, le temps et généralement les états sont discrets* (Dauphiné, 1987 ; Ellerkamp, 2001). Cet espace peut être unidimensionnel, bidimensionnel et même tridimensionnel. Le temps est considéré comme discret car, les cellules peuvent changer d'état à chaque pas de temps ((t+1 en fonction de (t)). On peut alors évoquer la notion d'évolution et/ou d'émergence, et même de génération induite par la variable temporelle. Il faut noter que l'évolution d'une cellule est déterminée par son voisinage puisque chaque cellule évolue en fonction des relations qu'elle entretient avec d'autres cellules en nombre fini, comme l'indique ainsi Philippe Ellerkamp : *Le changement d'état d'une portion d'espace est défini en fonction d'une règle de transition, invariante dans l'espace et dans le temps, prenant en compte l'état de cette portion au pas de temps précédent ainsi que ceux de ses plus proches voisins* (Ellerkamp, 2001).

Objet de mode ayant envahi toutes les sciences, les automates cellulaires ont vu leur nombre se multiplier à partir des années 1980 d'où la nécessité de la part des scientifiques (Wolfram, 1984) de mettre en place des méthodes de classification se révélant « simples et pédagogiques ». Toutefois, il demeure encore aujourd'hui difficile de procéder à une quelconque classification de toutes les catégories d'automates cellulaires existantes sans susciter la controverse.

2.2.2. Les Automates Cellulaires « inclassifiables »

Dans cette section, il est question de mettre en évidence le problème que pose la question de la classification des automates cellulaires pour le monde scientifique. Même s'il est indispensable de faire état de ce problème, ne faudrait-il pas le dépasser et s'interroger sur la pertinence à classer de manière « simple et pédagogique » les automates cellulaires quand ces derniers sont, dans leur entièreté « complexes », parce qu'appelés à décrire, apporter des réponses et prédire l'évolution des dynamiques spatiales et/ou de situations qui souvent sont fondamentalement complexes ?

Parce qu'ils sont divers et variés, des classifications portant sur les automates cellulaires selon l'échelle de complexité existent. La plus célèbre est celle de Stephen Wolfram qui, en 1984, propose de considérer quatre grandes « classes de complexité » des automates cellulaires au terme de phases transitoires (cf. figure : 2.5 et 2.6). Wolfram distingue alors les automates cellulaires de classe 1 (cf. figure 2.5 en haut à gauche) qui, après un cycle dans l'espace-temps arrivent à un état uniforme. Ce sont des automates cellulaires *uniformes*. Ceux de classes 2 (cf. figure 2.5 en haut à droite) à la suite de ce même cycle,

catalysent périodiquement et à répétition différents états. Ce sont des automates cellulaires dits *périodiques*. Les automates cellulaires de classes 3 (cf. figure 2.5 en bas à gauche) observant le même cycle produisent quant à eux des comportements chaotiques. Ce sont des automates cellulaires *chaotiques*. Au terme de la phase transitoire, les automates cellulaires appartenant à la classe 4 (cf. figure 2.5 en bas à droite) engendrent des états complexes car chaque cellule est animée d'une existence propre/singulière. Toutefois, les automates de ces classes distinctes sont trompeurs car, *déterminer si un automate cellulaire appartient à l'une ou à l'autre de ces quatre classes est un problème indécidable pour la simple raison qu'il n'existe aucun algorithme qui, prenant en « entrée » un tel automate cellulaire donne en « sortie » son appartenance ou non à une ou à l'autre de ces classes* (Delorme et Mazoyer, 1999). La classification précédemment décrite peut sembler inextricable, aussi dans le but d'en simplifier la lecture, il conviendra de se référer au tableau 5. Dans la même optique que le tableau 5, les figures 2.5 et 2.6 visent à offrir un éclairage sur la structure des différentes classes de Wolfram formalisées graphiquement par Michael Batty en 2005 (Batty, 2005). Devant la diversité des interventions à propos de la problématique de la classification des automates cellulaires, comme c'est le cas avec les hypothèses proposées par Langton (1990) visant à améliorer la classification de Wolfram, nous ne nous étendrons pas sur le problème de la classification des automates cellulaires qui risque de nous entraîner vers des exposés fastidieux dépassant la dimension de cette recherche, aussi conviendrons-nous qu'il s'agit là d'un sujet pouvant à lui seul faire l'objet d'une thèse, dans la mesure où cette question reste encore toujours ouverte.

La figure de Waclaw Sierpinski (cf. figure 2.6) est l'exemple type d'un automate cellulaire de classe III à une dimension, c'est-à-dire simple et élémentaire de structure, et dont l'évolution dans l'espace-temps fait émerger des situations complexes et chaotiques difficiles, voire impossibles à prévoir du fait des comportements complexes des cellules (cf. figure 2.5b à droite de la page). Ainsi, les figures (2.5 et 2.6) viennent rappeler le paradoxe des automates cellulaires, autrement dit, le contraste et/ou l'écart existant entre l'extrême simplicité de leurs structures et la complexité inattendue de leurs comportements (Couclelis, 1985). Toutefois, même si du fait de leur nombre illimité les automates cellulaires demeurent encore aujourd'hui des outils « inclassifiables », ils peuvent reproduire en raison de leur complexité, le système-monde dans lequel nous vivons. Ce qui fait dire à Couclelis : *It is not a coincidence that the first widely popular cellular automaton was called the « game of life ».* *But if the world is like a game and cellular automata are a kind of game, then cellular automata (perhaps) like the world, in that simple well-understood interaction rules can determine the most complex, unpredictable, forms of evolution.* (Couclelis, 1997).

Tableau 5. Classification des automates cellulaires

Classe	Attracteur	Dynamique
Classe I	Points limites	Après un certain nombre de cycles, l'automate tend à atteindre un état unique partant de configurations initiales différentes
Classe II	Cycles limites	L'automate aboutit à une phase de répétition périodique des états
Classe III	Attracteur étrange et comportement chaotique	A partir de la majorité des états initiaux, ce type d'automate mène à des figures chaotiques. Pour des automates 1D on reconnaît clairement des figures fractales telles que le triangle de Sierpinski ³³ (cf. Figure 2.6)
Classe IV	Comportement plus complexe	Après un certain nombre de cycles, ce type d'automates se place dans un état « mort ». Néanmoins, un petit nombre de figures stables peuvent subsister dans <i>le jeu de la vie</i> .

Sources : Fatés, 2001

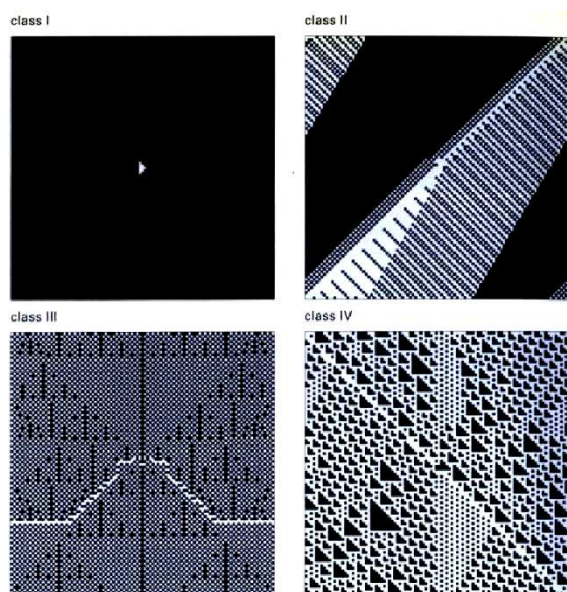


Figure 2.5 : Four types of dynamics for a two-state, one three-cell, one dimensional CA model

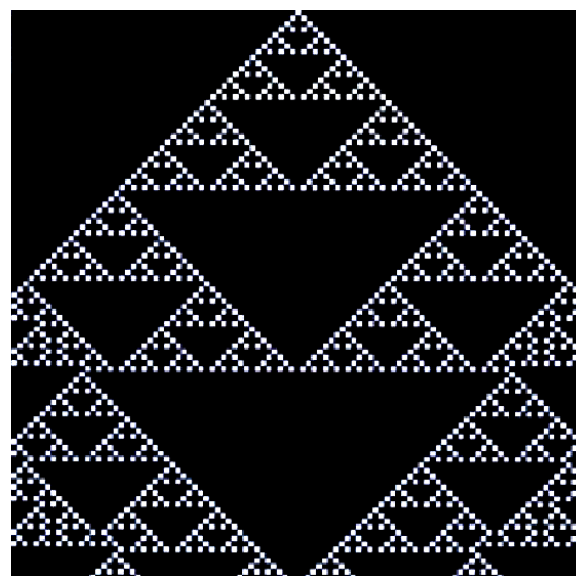


Figure 2.6 : Structural (Sierpinski) order in a dimensional cellular automaton

Sources : Batty, 2005

³³ Ce triangle n'est rien d'autre qu'une fractale du nom de Wacław Sierpinski, appelé aussi Le joint de culasse de Sierpinski. (exemple : le triangle Sierpinski à sept itérations)

2.2.3. Automates cellulaires et modèles basés sur les automates cellulaires

Les automates cellulaires élémentaires à partir de règles simples produisent des formes complexes comme les formes fractales (cf. figures 2.5 et 2.6), et les modèles basés sur les automates cellulaires tout en s'inspirant de la philosophie des automates cellulaires sont caractérisés par une structure plus complexe leur permettant de simuler la dynamique des systèmes complexes. Au niveau des automates cellulaires élémentaires, les cellules sont autonomes, elles sont construites sur une grille bidimensionnelle qui représente l'environnement cellulaire, en d'autres termes l'espace des cellules. Dans cette catégorie d'automates cellulaires, le temps est incrémenté à chaque itération donnée et le voisinage de relation est constitué de 9 cellules (cf. tableau 6 à gauche). En revanche, les modèles basés sur des automates cellulaires (cf. tableau 6 à droite) sont caractérisés par un fonctionnement plus complexe car les automates cellulaires qui y sont développés ont subi une transformation profonde voire même drastique. Cette catégorie d'automates cellulaires constitue aujourd'hui la base de beaucoup de modèles dynamiques et spatialement explicites.

Par ailleurs, contrairement à un automate cellulaire élémentaire et/ou simple, en ce qui concerne les modèles basés sur les automates cellulaires, les cellules sont des pixels généralement définis dans un environnement de Système d'Information Géographique. Le temps y est indiqué en unité et chaque pas de temps représente une année. L'espace est géographique avec des échelles différentes (villes, quartiers, régions, pays ou continent). Le voisinage de relation ainsi que les règles de transition qui déterminent et fondent la dynamique du modèle sont conditionnés par des paramètres et des caractéristiques spécifiques à chaque modèle. Ainsi, les modèles basés sur les automates cellulaires sont fondamentalement différents des automates cellulaires élémentaires car ces derniers n'offrent pas la possibilité de simuler la dynamique des systèmes complexes. Les modèles basés sur les automates cellulaires à partir de leurs propriétés dynamiques sont adaptés aux problématiques évoquant la dynamique des systèmes spatiaux complexes en géographie.

Tableau 6 : Propriété des CA standards et des CA-based models

Cellular Automata ³⁴	Cellular Automata-based models ³⁵
• The space is gridded world • cells have finite states (live, dead) • Time is incremental (iteration) • Rules define state transitions • Neighbourhood template (9 cells) • Cells are autonomous • Classic example is Conway's LIFE	• Cells are pixels (raster GIS) • States are land uses • Time is "unit", e.g. years • Rules determine urban growth and change • Different models have different sets and neighbourhood • Many models now developed: e.g. MOLAND, SLEUTH, Environment Explorer; Variable Grid;

Source : Barredo *et al* : 2003

2.3. Pourquoi avoir choisi les modèles basés sur les automates cellulaires ?

Dans cette section, sont exposés les arguments qui nous ont amenée à choisir les automates cellulaires dans le cadre de la simulation des futurs possibles de l'espace transfrontalier franco-italien au lendemain de la mise en service de la LGV PACA.

2.3.1. Simulation spatiale

Les modèles basés sur les automates cellulaires grâce à leurs propriétés (cf. tableau 6 à gauche) permettent de simuler l'évolution d'un phénomène passé, présent et futur. Ce sont ainsi des outils pertinents pour la réalisation d'images futures (prospective/prédiction). Pour illustrer nos propos nous allons citer deux cas de simulation spatiale. Dans le premier cas, nous exposons l'évolution de la population d'Avignon entre 1936 et 1999 (Ellerkamp, 2001). Cet exemple montre la capacité des modèles basés sur les automates cellulaires à reproduire la réalité. En effet, en observant de plus près les figures 2.7 et 2.8, on constate une forte similarité entre la réalité observée de 1936 à 1999 (cf. figure 2.8) et la réalité simulée du phénomène à différents pas de temps (de t_0 à $...t_n$) (cf. figure 2.7).

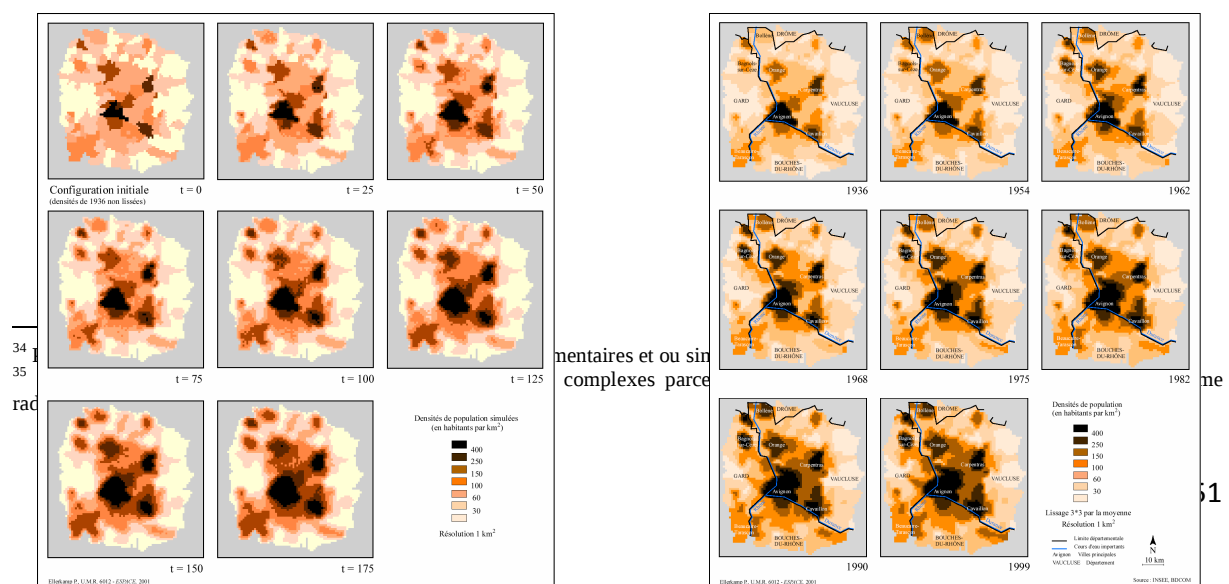


Figure 2.7 : Simulation de dynamiques spatiales
de densification autour d'Avignon

Figure 2.8: Densités de population de la région
d'Avignon : situation observée

Source : Ellerkamp, 2001

La justesse de la simulation à prévoir une situation présente à partir d'une réalité historique, prouve la faculté qu'ont les automates cellulaires à fournir une prédiction crédible et réaliste du futur possible. Dans le second cas, il s'agit de montrer la capacité d'un modèle basé sur les automates cellulaires de prédire un phénomène de croissance urbaine dans le futur. Comme l'illustre la simulation effectuée sur le Nigéria entre 1984 et 2020 (cf. figure 2.9), ces outils sont capables non seulement de reproduire la réalité présente d'un espace (Lagos observé en 2000 et Lagos simulé en 2000) mais aussi de prévoir, en se basant sur les conditions initiales du territoire (passé + présent), son devenir (Lagos, 2020).



Figure 2.9. : Croissance urbaine à Lagos (Nigéria) : à gauche de la figure = Situation observée en 2000
et à droite de la figure situation simulée en 2020.

Source : Barredo *et al.* 2004

2.3.2. Effets de voisinage

La notion de voisinage revêt un caractère fondamental pour l'étude des systèmes spatiaux en général, et plus particulièrement pour celle des espaces transfrontaliers car, l'évolution des territoires transfrontaliers est le produit d'échanges, d'interactions et d'interrelations entre différentes unités spatiales proches. À ce titre, on évoque le terme d'effets de voisinage pour désigner des relations de cause à effets entre des éléments d'un système voisin proche ou contigu quelle que soit l'échelle (Brunet, 1992). Ces relations de proche en proche amènent à considérer d'autres concepts comme celui de la *distance*, qui renvoie à la mesure entre différents objets situés dans l'espace géographique : la *distance-temps*, ici, le temps que l'on va mettre pour aller d'un point A à un point B ; la *distance decay effect/l'effet distance*. Par exemple, le rôle de la distance sur l'accessibilité et/ou l'attractivité d'un territoire par rapport à un autre ; la *contiguïté*, consiste en l'analyse des relations de proximité entre deux phénomènes étudiés, et tient donc compte de la distance ; ou même la

diffusion, qui indique l'expansion et/ou la propagation d'un phénomène dans l'espace et dans le temps (Hägerstrand, 1953).

C'est Tobler en 1970 qui saisit plus que quiconque, l'importance de l'effet de voisinage en Géographie : *Everything is related to everything else, but near things are more related than distance things*. Il marque ainsi l'intérêt de la prise en compte des entités spatiales proches et en contact dans l'évolution des systèmes territoriaux. Aujourd'hui considérer les relations de voisinage fait partie de la diversité des techniques élémentaires dont dispose le géographe pour comprendre son anthroposystème. L'effet de voisinage est central dans le paramétrage des modèles basés sur les automates cellulaires car l'état futur de chaque cellule dépend des relations de voisinage que chaque cellule entretient avec la cellule voisine de gauche et/ou de droite : *The notion of neighbourhood is central to the CA paradigm and appears to be the only defining characteristic of the framework that has survived all attempts at generalization* (Couclelis, 1997). Ainsi, dans le cadre de l'appréhension de l'évolution des systèmes complexes comme les espaces transfrontaliers, la prise en compte de l'effet de voisinage est déterminante et grâce au principe de règles de transition, les modèles basés sur les automates cellulaires sont conçus pour la faciliter.

2.3.3. Le principe de transition

Le concept de transition évoque un passage progressif d'un état/situation A vers un état/situation B. Ces états/situations sont déterminés par des processus d'évolution qui amènent à passer progressivement de A vers B. À titre d'exemple, on parlera de transition démographique pour évoquer le changement qu'a connu la population d'un pays au cours du temps. Replacée dans le contexte des automates cellulaires, une transition est avant tout fondée sur des règles (transitions rules/règles de transition) qui déterminent l'évolution progressive des cellules dans un espace-temps donné (cf. figure 2.10).

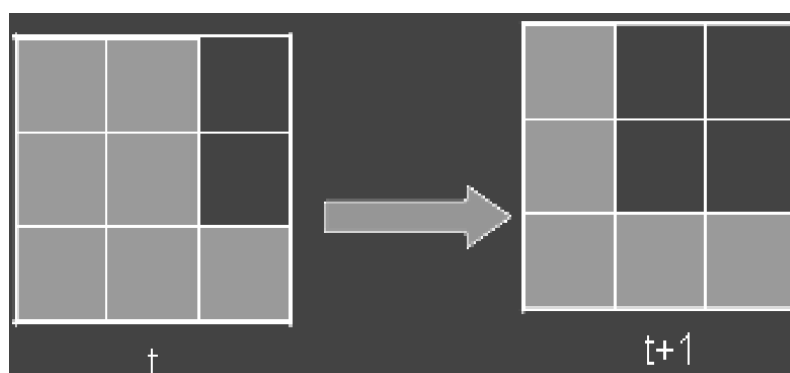


Figure 2.10 : Principe de transition

Pour mieux comprendre et expliciter le principe des règles de transition nous allons revenir à l'exemple d'Avignon (Ellerkamp, 2001). Dans ce cas précis, la règle de transition se situe à deux niveaux. D'abord au niveau du processus de diffusion de la population contenue dans les cellules. Ici, les interactions générées entre cellules voisines ont permis *d'initier les dynamiques d'extension spatiale des aires les plus densément peuplées*. Le second niveau de la règle de transition est la dépendance à la situation initiale. A ce niveau, la population des cellules est accrue *afin d'alimenter les mouvements spatiaux initiés par la diffusion, en tenant compte des configurations locales au pas de temps précédent*. Chaque cellule voit sa population augmenter. Cette croissance provient des gains mais aussi des pertes de chaque cellule en termes de population. Le comportement de chacune des cellules est à mettre en relation avec l'évolution de la population avignonnaise qui a plus que doublé entre 1936 et 1999. Pour arriver à ces résultats, c'est-à-dire aux apports en population enregistrés par chaque cellule, plusieurs itérations sont nécessaires. En effet, à chaque itération ou équation de récurrence, autrement dit à chaque action récurrente qui est réitérée, les cellules implémentent une équation ou règle de transition propre à chaque modèle. Il y a autant de règles de transition qu'il y a de modèles. Dans l'exemple d'Avignon, la règle de transition est la suivante :

$$s_{ij}^{(t+1)} = \begin{cases} (u + v)si(\zeta \leq p) \\ u \text{ sinon} \end{cases}$$

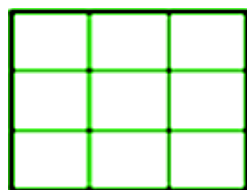
- S, est la valeur de la population de chaque cellule
- ij, fait référence au temps (t)
- u, le processus de diffusion
- v, l'apport exogène (la population provenant de l'extérieur du système)
- p, la population donnée

2.3.4. Taille des cellules et approche multiscalaire

Grâce à leurs cellules qui se présentent en différentes tailles - une cellule pouvant être égale à 500*500 pour les petites échelles ou 100*100 pour les grandes échelles (cf. figure 2.11) - les automates cellulaires s'ajustent aisément en fonction de l'aire d'étude. Pour exemple, les limites administratives des communes françaises, du fait de leur relative petite extension, doivent être modélisées en utilisant une fine résolution, autrement dit avec des cellules ayant une taille inférieure ou égale à 100*100 (cf. figure 2.11). Aussi, parce que les cellules sont arrangées en différentes tailles, il est possible d'intégrer une approche multiscalaire (cf. figure 2.12.) pour une meilleure compréhension des fonctionnements des systèmes complexes.

Par conséquent, prenant en compte l'espace généralement représenté par une matrice de cellules, les modèles basés sur les automates cellulaires offrent la possibilité de visualiser à

différentes échelles spatiales la diffusion d'un phénomène tout comme la concentration de ce même phénomène dans l'espace et dans le temps.



1 cell = 500*500



1 cell = 100*100

Figure 2.11 : Cell sizes

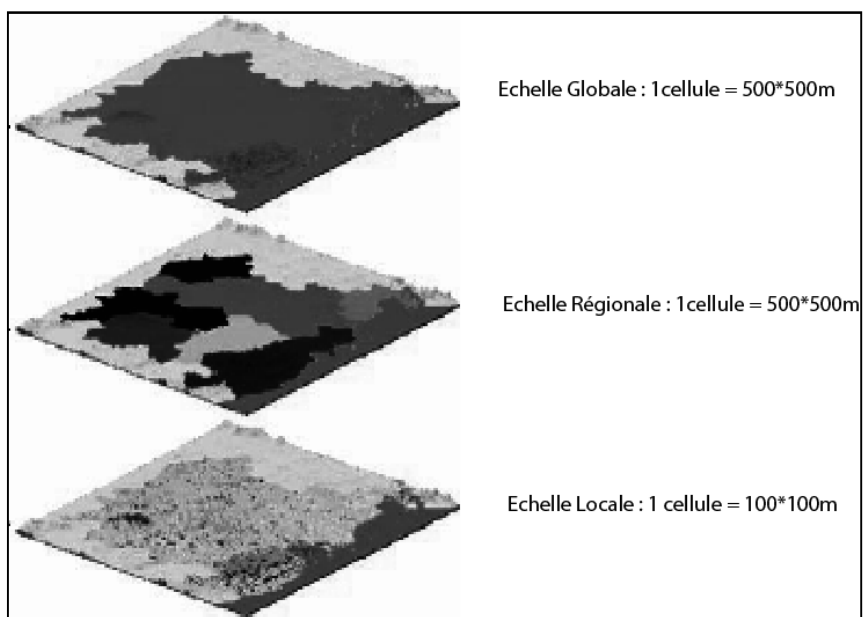


Figure 2.12 : Approche multiscalaire

Source : White et Engelen, 2000

Après avoir répertorié les raisons diverses (simulation spatiale, effets de voisinage, règles de transition ou encore approche multiscalaire) qui justifient le choix des automates cellulaires, nous pouvons établir la synthèse suivante : l'intérêt principal des automates cellulaires réside dans leurs capacités à rendre compte de façon réelle, des interactions spatiales du fait des effets de contiguïté et de voisinage. Ainsi, pour le géographe et bien d'autres scientifiques, il devient possible de comparer des structures spatiales différentes ou des formes spatiales émergentes, produites à partir de règles de transition constantes et d'effets de voisinage. De ce fait, les modèles basés sur les automates cellulaires permettent la reconnaissance des processus créateurs de structures spatiales diverses et variées.

2.4. Pourquoi le choix de Urban Growth Moland Model ?

2.4.1. Qu'est-ce que Moland-Model ?

Le Joint Research Centre d'Ispira a été chargé par la Commission européenne de développer des travaux utiles à la planification urbaine et régionale de l'Europe et notamment, d'offrir aux acteurs et autres gestionnaires des territoires confrontés à des difficultés dans les phases de prises de décision, un outil leur permettant de comprendre le fonctionnement complexe des systèmes spatiaux, afin qu'ils puissent anticiper au mieux leur devenir. Au début des années 2000, deux modèles de dynamiques urbaines (Urban growth Moland Model/ vs MURBANDY-Model et du Régional Growth Moland Model), destinés à explorer les futurs possibles des territoires urbains à partir d'une variété de scénarios de politique d'aménagement et de planification, ont été conçus au Research Institute for Knowledge Systems de Maastricht, par Guy Engelen, Roger White et Inge Uljee, en collaboration avec le Joint Research Centre..

Moland, appartient à la famille des modèles dits intégrés qui ont la particularité d'être dynamiques et spatialement explicites (cf. tableau 7). En 1979 déjà, Tobler qualifie certains de ces modèles comme des « *Géographical models* » du fait de leur capacité à répondre aux problématiques géographiques liées à la dynamique des systèmes complexes (Tobler, 1979). L'émergence des modèles dits intégrés est toutefois à mettre en relation avec le développement de l'approche *bottom-up* qui consiste à la prise en compte de la plus petite action au niveau local de l'anthroposystème. En effet, cette approche considère que les structures qui émergent sont le produit d'actions locales et qu'il faut s'intéresser au niveau le plus fin (villes, communes, quartiers, centres urbains...) pour pouvoir détecter les probables changements et/ou transformations que l'anthroposystème devrait subir. C'est ainsi que l'approche *bottom-up* va favoriser le développement d'outils à l'image des modèles basés sur les automates cellulaires visant à mettre en évidence l'évolution possible des systèmes complexes (Allen, 1978 ; White et Engelen., 1994).

Tableau 7 : Caractéristiques techniques de neuf modèles dynamiques

Model	Predicted Transitions	Exogenous Quantity	Uses Year 2 Quantity	Pure Pixels	Case	Literature
Geomod	Single	Yes	No	Yes	Worcester	Pontius et al. 2001, Pontius and Spencer 2005, Pontius et al. 2006
SLEUTH	Multiple	No	No	Yes	Santa Barbara	Dietzel and Clarke 2004, Goldstein 2004, Silva and Clarke 2002
Land Use Scanner	Multiple	Yes	No	No	Holland(8)	Hilferink and Rietveld 1999, Koomen et al. 2005, Borsboom-van Beurden et al. 2007
Environment Explorer	Multiple	Optional	No	Optional	Holland(15)	de Nijs et al. 2004, Engelen et al. 2003, Verburg et al. 2004
Logistic Regression	Single	Yes	No	Yes	Perinet	McConnell et al. 2004
SAMBA	Multiple	No	No	Yes	Cho Don	Boissau and Castella 2003, Castella et al. 2005a, Castella et al. 2005b
LTM	Single	Yes	Yes	Yes	Twin Cities, Detroit	Pijanowski et al. 2000, Pijanowski et al. 2002, Pijanowski et al. 2005
CLUE-S	Multiple	Yes	Yes	Yes	Kuala Lumpur, Haidian, Maroua	Duan et al. 2004, Tan et al. 2005, Verburg and Veldkamp 2004, Verburg et al. 2002,
CLUE	Multiple	Yes	Yes	No	Costa Rica, Honduras	de Koning et al. 1999, Kok and Veldkamp 2001, Kok et al. 2001, Veldkamp and Fresco 1996, Verburg et al. 1999

Source : Pontius *et al.*, 2007

2.4.2. Les objectifs de Moland

Trois principaux objectifs ont accompagné la création du modèle Moland. Le premier objectif est de simuler la croissance urbaine ou régionale. Le second objectif porte sur l'aspect soutenable de l'urbanisation (aide à la décision) et l'adaptation aux risques naturels dans les aires urbanisées. Le dernier objectif est de prévoir le devenir urbain des espaces.

Nous l'avons compris, le modèle MOLAND a pour but de représenter les systèmes de manière authentique en s'accommodant des aspects de la réalité en incorporant des processus d'interaction "macroscopique" aussi bien que des attributs "microscopiques" qui représentent la non-homogénéité de l'espace géographique dans laquelle les dynamiques se forment.

2.4.3. Les caractéristiques de Moland

2.4.3.1. Moland : un model d'automate cellulaire contraint, à niveaux multiples

Le modèle Moland comporte deux plateformes distinctes mais interdépendantes. Il s'agit de la plateforme Murbandy, plus connue sous le nom de « Urban Growth Moland Model » (que nous utilisons dans cette recherche) qui est destinée aux régions urbaines, et « Regional Growth Moland Model », qui est une plateforme plus adaptée aux régions de grande taille. Le modèle prend en compte quatre composantes relatives à l'économie, la démographie, l'occupation du sol et les transports. Il est construit sur une demande générée au niveau macro et intègre des tendances tirées de scénarios de croissance économique et démographique, nationale ou mondiale. Au niveau régional, le modèle calcule l'attractivité relative exercée par les différentes sous-régions pour les migrations résidentielles et les déplacements d'activités. Enfin, au niveau local, les processus de transformation de

l'occupation du sol sont appréhendés au moyen d'un automate cellulaire où la zone d'étude est représentée par une grille de cellules de petite dimension. Ce niveau micro est en relation avec le niveau macro (global et régional) où s'expriment les tendances économiques et les demandes dans les différents secteurs d'activité. Quatre éléments caractérisent chaque cellule : les attributs physiques, le zonage, l'accessibilité et l'effet du voisinage. Ces facteurs sont intégrés à l'équation ci-dessous déterminant les règles de transition :

$${}^tP_{k,x,y} = (1 + {}^tA_{k,x,y})(1 + {}^tS_{k,x,y})(1 + {}^tZ_{k,x,y})(1 + {}^tN_{k,x,y}) {}^tV, \text{ Équation (3)}$$

où,

${}^tP_{k,x,y}$ est le potentiel de transition d'Automate Cellulaire de la cellule (x,y) pour l'utilisation du sol K au temps t

${}^tA_{k,x,y}$ Accessibilité de la cellule (x, y) à l'élément de l'infrastructure r pour l'utilisation du sol K au temps t

${}^tS_{k,x,y}$ « Suitability » intrinsèque de la cellule (x,y) pour l'utilisation du sol K

${}^tZ_{k,x,y}$ est la réglementation du zonage (statut de zonage) de la cellule (x,y) pour l'utilisation du sol K

${}^tN_{k,x,y}$ est l'effet de l'espace de voisinage de la cellule (x,y) pour l'usage du sol K au temps t

tV est l'expression de la perturbation stochastique au temps t ; définie par $V = 1 + (-\ln R)^\alpha$, où $(0 < R < 1)$ est une fonction aléatoire uniforme et α est un paramètre autorisant l'ajustement de la taille de la perturbation stochastique.

À partir de cette règle, un potentiel de transition ou de changement est calculé pour chacune des cellules, à chaque itération de la simulation. Ce potentiel indique l'occupation du sol à laquelle la cellule est la mieux adaptée.

Dans Moland, les interactions des différents niveaux spatiaux sont fortes (cf. figure 2.13). Les tendances de la croissance globale sont des contraintes pour les sous-modèles régionaux. Ces derniers distribuent la croissance globale vers les sous-régions et les modèles micro déterminent précisément le lieu où la croissance va se porter. Les "potentiels de changements" au niveau micro calculés par le modèle expriment la pression qui s'exerce sur l'espace et constituent une information précieuse sur les retombées locales de tendances observées ou envisagées à un niveau supérieur. Elles influencent fortement l'attractivité relative exercée par chaque sous-espace. Inversement, du niveau local remonte une information sur la nature et la disponibilité de l'espace restant pour l'expansion future de chaque type d'occupation du sol.

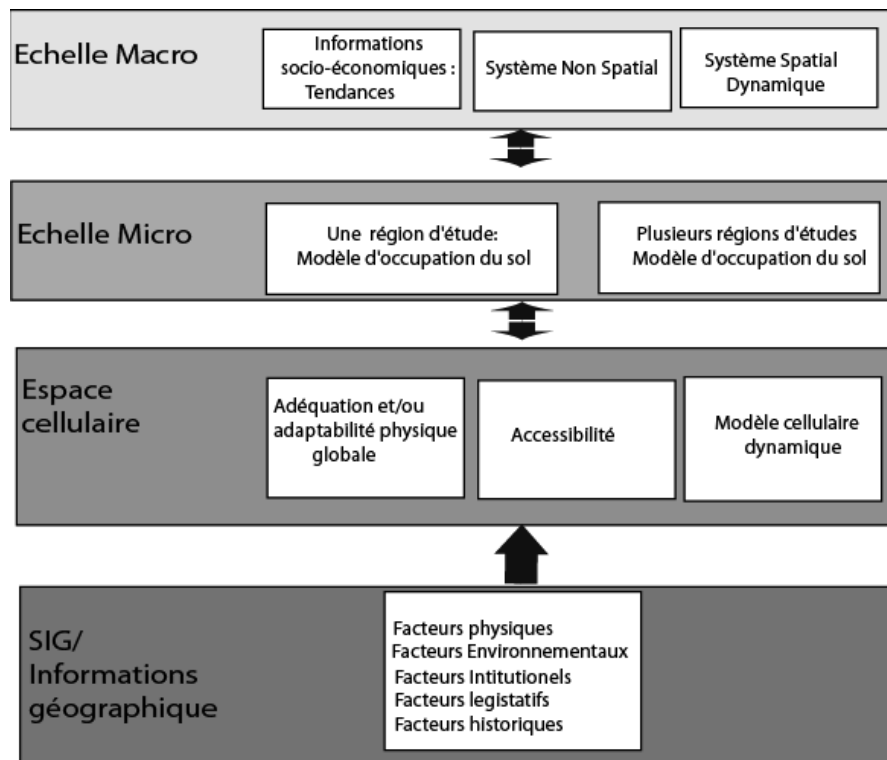


Figure 2.13 : L'approche multi-échelles du modèle Moland

Source : White et Engelen 2000

2.4.3.2. Moland : un espace cellulaire à dimension variable

C'est l'espace cellulaire représenté en deux dimensions qui fait de Moland un modèle ayant pour base, les automates cellulaires. Dans la « capsule » cellulaire, les cellules ont la forme de rectangles logés dans un espace euclidien, discret.

La taille des cellules peut varier entre 100m x 100m et 500m x 500m selon l'échelle à laquelle on travaille (locale, régionale ou globale). Un hectare étant l'espace minimum pouvant être représenté par le modèle. Dans notre cas (l'occupation du sol de l'espace transfrontalier franco-italien), la taille des cellules est égale à 100m x 100m et le nombre total de cellules représente 558 114 cellules.

2.4.3.3. Moland : un voisinage cellulaire de forme circulaire concentrique

Un voisinage, est « Une région d'influence définie comme une zone tampon externe tracée autour de chaque objet. La taille de la zone tampon détermine la région d'influence, expérimentée en unités métriques. Les objets situés en totalité ou en partie à l'intérieur de la zone tampon sont considérés comme des voisins de cet objet géographique et chaque voisin exerce une influence sur cet objet. L'influence de chaque voisin est définie par une fonction mathématique qui dépend de la superficie de ce voisin, de la distance entre le centroïde de ce dernier et l'objet géographique ainsi que la probabilité que cet objet géographique change d'état pour l'état de ce voisin » (Marceau *et al.*, 2008, p. 240). Dans le modèle Moland, le voisinage des cellules ou *the cell neighbourhood* correspond à une région circulaire appelée

the circular region, définie autour d'un rayon de 8 cellules. Le voisinage contient 196 cellules disposées à partir d'une distance discrète de 30 zones formant un cercle concentrique. Aussi, toutes les cellules du voisinage ont exactement un cercle concentrique où $d \in D$ est obtenu par la distance du nombre observé en fonction de la distance euclidienne du centre et la valeur accordée à leur position par rapport au centre concentrique (cf. figure 2.14 cercle 1).

L'indice du cercle dépend de la distance du cercle au centre du voisinage. La distance entre les cellules est définie par l'équation $\sqrt{Xd^2 + Yd^2}$, ici, Xd et Yd représentent la distance absolue d'un certain élément du centre qui est (comme l'indique la figure 2.14) soit horizontal, soit vertical.

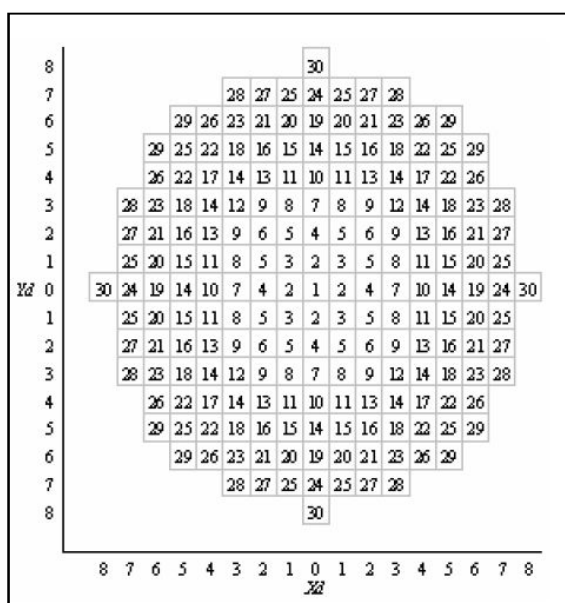


Figure 2.14 : Neighbourhood structure of MOLAND-Moland

All cells in the neighbourhood are in exactly one concentric circle. The index of the circle depends on the distance of the circle's cells to the centre of the centre of the neighbourhood (circle 1)

Source : (White *et al.*, 2000)

2.4.3.4. Moland : des cellules aux états multiples basées sur la classification de CORINE

Chaque cellule possède un état « *cell state* » représenté par une classe d'occupation du sol. Il existe trois types de cellules : les *cellules dynamiques* appelées aussi cellules actives qui sont couplées avec les informations de type socio-économique (populations, industrie, commerces, services...), les *cellules passives* (forêt, végétation, agriculture...) qui changent d'état en fonction de l'évolution des cellules dynamiques, et enfin les *cellules statiques* (mer, montagne et/ou pentes, réseaux de transport) qui ne changent pas (sauf à l'échelle géologique) et qui déterminent l'évolution et l'organisation spatiale des cellules dynamiques et passives. Les cellules passives et statiques sont couplées avec les informations de type environnemental, ces dernières étant elles-mêmes couplées avec le relief. Les cellules/classes d'occupation du sol nommées *land use activities* (industrie, commerce, service...) font

référence aux activités économiques, les cellules/classes appelées *residential land use* (*continuous urban fabric* et *discontinuous urban fabric*) concernent l'urbanisation, et les *natural land uses* désignent les caractéristiques physiques et environnementales du territoire.

Tableau 8 : Classes d'occupation du sol de l'aire de la modélisation

Classes Actives	Classes Passives	Classes Statiques/("features")
• Continuous urban fabric • Discontinuous urban fabric • Industrial or commercial areas	• Arable land • Permanent crops • Pastures • Heterogeneous agriculture areas • Forest • Shrubland and/or herbaceous vegetation • Sparsely vegetated area • Natural grassland	• Airports • Road and rail networks and associated land • Mineral extraction sites • Dump sites • Port areas • Water bodies* • Sea • Green urban areas*

Conclusion du chapitre 2

Les automates cellulaires sont des outils *a priori* simples de structure mais qui en réalité sont fondamentalement complexes dans leur comportement évolutif. À partir de règles basiques comme le Jeu de la Vie de Conway, ces outils d'apparence ludique et récréative produisent toutefois des formes de structures spatiales surprenantes et totalement inattendues comme l'illustrent les études portant sur la dimension fractale des structures spatiales et l'émergence de systèmes spatiaux à travers la problématique de la croissance et de la morphologie urbaine. Aussi, même si les automates cellulaires demeurent en général des outils « inclassifiables » du fait de leur nombre infini, il est généralement admis par la communauté scientifique qu'un automate cellulaire consiste en :

- Un *espace Euclidien*, divisé en un tableau de cellules identiques. Pour des applications géographiques, un tableau à 2 ou 3 dimensions est plus pratique.
- Un voisinage de cellules, pour les processus de flux et de diffusion, les 4 voisinages immédiats de *Von Neumann* ou les 8 voisinages immédiats de *Moore* sont suffisants mais, pour la plupart des processus socio-économiques de diffusion, des voisinages plus grands sont requis.
- Un ensemble *d'état de cellules* discontinues.
- Un ensemble de *règles de transition* qui déterminent l'état d'une cellule comme une fonction des états des cellules dans le voisinage ;
- Des *étapes de temps discontinus*, avec tous les états de cellules mis à jour simultanément.

Les automates cellulaires restent encore aujourd'hui des outils populaires parce que considérés comme étant *universels*. Configurés sur une grille de cellules homogènes et à partir de règles de transition et des effets de voisinage, les automates cellulaires arrivent à évoluer dans le temps voire même dans certains cas indéfiniment. Par leurs caractéristiques élémentaires, les automates cellulaires permettent de prendre en compte les interactions existant entre différents sous-systèmes et aussi celles qui existent entre les différents éléments composant un système dynamique.

L'émergence et le développement des modèles basés sur les automates cellulaires à l'image de Moland, se sont accompagnés d'un accroissement de la complexité de ces modèles et d'une volonté de construire des outils de simulation plus réalistes tenant compte des hétérogénéités qui se trouvent dans l'espace géographique où, dans le même temps, se forment des processus d'interactions et de rétroactions situées à différents niveaux d'un anthroposystème. Dès lors, les modèles basés sur les automates cellulaires deviennent incontournables pour l'acquisition de nouvelles connaissances indispensables pour la prédiction d'états futurs des systèmes spatiaux complexes.