



UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE MATHÉMATIQUES ET D'INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'INFORMATIQUE



MEMOIRE de fin d'études

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

Domaine : Mathématiques et Informatique

Filière : Informatique

Spécialité : Informatique Décisionnelle et Optimisation

Par : Mlle KADRI Yassamine

THEME

**Modélisation de l'évolution urbaine par
automate cellulaire
Cas d'application : ville de M'sila**

Soutenu publiquement le : devant le jury composé de :

Pr. AKHROUF Samir

Pr. HERAGUEMI Kamel-Eddine

Dr. HEMMAK Allaoua

UMB M'sila

UMB M'sila

UMB M'sila

Président

Examineur

Rapporteur

Promotion : 2021/2022

Remerciements

Je présente mes sincères remerciements pour mon encadreur, **Mr HEMMAK Allaoua** pour son aide et ses conseils tout au long de ma mémoire.

De façon plus générale, je remercie toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin dans ce modeste travail.

Dedicace

Je dédie ce travail à Mes parents , A mes frères et mes sœurs , A mes amies. A tous mes professeurs, À moi, de moi.

Enfin!

Tables des matières

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| Introduction générale..... | 01 |
|-----------------------------------|-----------|

Chapitre I : Evolution Urbaine

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 05 |
| 2. Evolution urbaine..... | 05 |
| 3. Mode d'urbanisation..... | 07 |
| 4. Géo simulation urbaine..... | 08 |
| 5. Urbanisation et développement durable..... | 09 |
| 6. Urbanisation dans le monde..... | 09 |
| 7. Modélisation du système urbain..... | 10 |
| 8. Conclusion..... | 11 |

Chapitre II : Automates cellulaires

| | |
|------------------------------------|----|
| 1. Introduction..... | 12 |
| 2. Les Automates cellulaires..... | 13 |
| 3. Définition..... | 17 |
| 4. Définition 1..... | 20 |
| 5. Définition 2..... | 20 |
| 6. Origines et développement..... | 21 |
| 7. Caractéristiques..... | 22 |
| 8. Propriétés..... | 26 |
| 9. Terminologie..... | 29 |
| 10.Le jeu de la vie..... | 30 |
| 11.Classification de WOLFRAME..... | 34 |
| 12.Les Automates cellulaires..... | 36 |
| 13.Domaine d'application..... | 38 |
| 14.Conclusion..... | 40 |

Chapitre III : La modalisation par automates cellulaires

| | |
|--|----|
| 1. Introduction..... | 40 |
| 2. Etat de l'art :..... | 40 |
| 3. La modalisation..... | 45 |
| 4. Modalisation par Automates cellulaires..... | 46 |
| 5. Utilisations des Automates cellulaires en modalisation..... | 48 |
| 6. Création des automates cellulaires..... | 48 |

| | |
|---|----|
| 7. Différentes variantes d'automates cellulaires..... | 50 |
| 8. Structure de l'automates..... | 53 |
| 9. Conclusion..... | 57 |

Chapitre IV: Simulation urbaine de la ville M'sila par l'AC

| | |
|---|----|
| 1. Introduction..... | 57 |
| 2. Problématique..... | 58 |
| 3. Contexte..... | 58 |
| 4. Présentation de la ville du M'sila..... | 59 |
| 5. Analyse de l'évolution de l'espace de la ville M'sila..... | 60 |
| 6. Secteurs de la ville de M'sila..... | 64 |
| 7. Résultats du l'analyse de la ville M'sila..... | 66 |
| 8. Conduit à tenir..... | 66 |
| 9. Conclusion..... | 68 |

Chapitre IIV : Implémentation et résultats

| | |
|--|----|
| 1. Introduction..... | 69 |
| 2. Langage de programmation et environnement de développement..... | 69 |
| 3. Description de logiciel..... | 71 |
| 4. Conclusion..... | 73 |

conclusion générale.....75

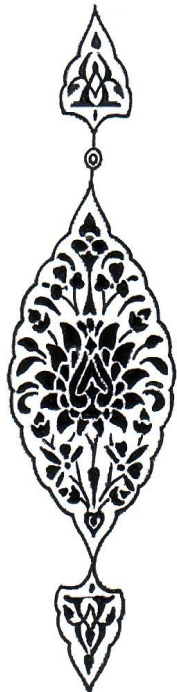
Résumé

Liste des Figures

| | |
|--|----|
| Figure I.1 : Modélisation du système urbain..... | 09 |
| Figure II.1 : Voisinages de Moore (a) et de Von Neumann (b) | 16 |
| Figure II.2 : Règle de mise à jour d' AC..... | 19 |
| Figure II.3 : Composants d'un automate cellulaire..... | 19 |
| Figure II.4 : voisinage de Von Neuman et de Moore..... | 22 |
| Figure II.5 : voisinage de Moore étendu et de Margolus..... | 22 |
| Figure II.6 : variation de voisinage de Von Neuman..... | 23 |
| Figure II.7 : voisinage des cellules de bord..... | 23 |
| Figure II.8 : propriété de reproduction..... | 26 |
| Figure II.9 : l'automate déplacement Est..... | 27 |
| Figure II.10 : automate de type jeu de la vie..... | 27 |
| Figure II.11 : règle de survie dans jeu de la vie..... | 28 |
| Figure II.12 : règle de mort dans jeu de la vie..... | 29 |
| Figure II.13 : règle de naissance dans jeu de la vie..... | 29 |
| Figure II.14 : jeu de vie..... | 30 |
| Figure II.15 : exemple de jeu de la vie..... | 32 |
| Figure II.16 : exemple de jeu de la vie..... | 32 |
| Figure II.17 : les 256 automates de Wolframe | 34 |
| Figure II.18 : automate cellulaire..... | 36 |
| Figure III.1 : Schéma méthodologique général de modélisation et de simulation [Schmidt et Pavé, 2002..... | 45 |
| Figure III.2 : Différentes dimensions d'un automate cellulaire..... | 50 |
| Figure III.3 : Tessellations du cas bidimensionnel : (A) grille carrée; (B) grille triangulaire et (C) grille hexagonale..... | 50 |
| Figure III.4 : Tessellation tridimensionnelle cubique..... | 50 |
| Figure III.5 : (A) Voisinages de Von Neumann; (B) de Moore; (C) de Von Neumann étendu et (D) de Moore étendu..... | 51 |
| Figure III.6 : Voisinage pour une tessellation hexagonale..... | 51 |
| Figure III.7 : Composantes typologiques des automates cellulaires..... | 52 |
| Figure IV.1 : Localisation de la région d'étude Carte d'occupation des sols de la wilaya de M'sila..... | 59 |
| Figure IV.2 : Les quartiers et places publiques de la ville de M'sila pendant la période coloniale (1950)..... | 60 |
| Figure IV.3 : La première installation urbaine coloniale aux abords du quartier d'El Argoub aux alentours de 1895..... | 60 |
| Figure IV.4 : Évolution spatiale de la ville de M'sila..... | 61 |
| Figure IV.5 : Étalement urbain de la ville de M'sila..... | 62 |
| Figure IV.6 : Évolution de la population, urbanisation et ratio des espaces verts urbains de la ville de M'sila..... | 63 |
| Figure IV.7 : Evolution spatiale de la ville de M'sila..... | 64 |
| Figure V.1 : Interface Principal..... | 71 |

| | |
|--|----|
| Figure V.2. Apporter le fichier texte..... | 71 |
| Figure V.3. Affichage de la matrice sur text area..... | 71 |
| Figure V.4. Présentation de l'Automates Cellulaires..... | 72 |
| Figure V.5. L'Apprentissage..... | 72 |
| Figure V.6 : Exemple de Apporter le fichier texte..... | 73 |
| Figure V.7 : Affichage de la matrice d'état de la ville M'sila en 2013... | 73 |
| Figure V.8: l'Automate Cellulaire qui représente l'état de l'année 2013..... | 74 |
| Figure V.9 : Apprentissage de l'état d'automates cellulaires d'année 2013..... | 74 |
| Figure V.10 : Résultat de la Prédiction..... | 75 |

Introduction générale





Introduction générale

De notre temps, sans l'avancement théorique, méthodologique et technique une bonne compréhension du monde et de ses changements ne peut avoir lieu qui décode les dynamiques complexes des systèmes humains et environnementaux. Ces systèmes peuvent être représentés en tant que processus évoluant dans l'espace et dans le temps. Pour une meilleure représentation de ces processus, il est nécessaire de considérer leurs caractéristiques spécifiques telles que la dimension du phénomène, son étendue spatiale, sa continuité, sa dynamique, sa fréquence dans le temps et ses différentes échelles spatiales et temporelles. La prise en compte de tous ces critères exige des outils appropriés permettant d'abord de mieux comprendre le comportement de tels processus et ensuite de simuler les différents scénarios possibles et d'en anticiper les conséquences, afin d'aider les gestionnaires à prendre des décisions éclairées. C'est ainsi que la représentation, la de modélisation et la simulation des processus spatiotemporels constituent des outils d'aide à la décision dans un sens de gestion du territoire, de protection de l'environnement et de développement durable. Cette étude joue en outre à la fois le rôle de trait d'union entre les disciplines scientifiques, techniques et sociales et aussi d'élaboration de modèles opérationnels.

Notre sujet est Modélisation Evolution Urbaine par Automate Cellulaire en Prendre la ville de M'sila comme cas d'étude Modéliser l'évolution urbaine veut dire aussi « fabrique » de la ville au travers de l'expérimentation virtuelle. Cependant Nous avons montrer qu'il est possible de développer un modèle qui n'est pas basé sur des équations mathématiques, mais sur des règles qualitatives d'évolution de l'espace, traduites assez directement du langage naturel et facile. Ces règles s'appliquent en chaque lieu (les cellules de l'automate) et permettent de faire évoluer l'occupation du sol par la mise en concurrence entre les contraintes internes de développement de chaque cellule et des contraintes externes venues des cellules environnantes. Entre force de vie qui tente de faire perdurer l'état actuel et forces environnementales qui tentent de le changer. Le système complexe – ville, ainsi modélisé, En tant que tel, dans un jeu permanent d'actions et de rétroactions.

L'objectif de cette recherche consiste à proposer un modèle spatial se rapprochant encore plus de la réalité du terrain susceptible d'être employé dans un système de évolution urbaine et permettant d'améliorer le raisonnement spatial appliqué sur les données et les résultats des modèles réguliers traditionnels ,Tout cela dans l'intérêt d'une réalité plus belle pour la ville de M'sila et pour l'amélioration de l'urbanisation en anticipant l'état de la ville

dans le futur .Ces simulations facilitent la planification future .Dans le but de planifier une stratégie rationnelle qui garantit tous les besoins de la population tout en maintenant les conditions en vigueur.

Organisation du mémoire

Ce mémoire est structuré en cinq chapitres, incluant le présent chapitre d'introduction.

Le première chapitre présente de façon détaillée évolution urbain de tout le monde et les différentes modes de l'urbanisation et ces développements car elle est phénomène global qui puise ses racines dans l'histoire des populations humaines.

Le second chapitre et spécialement pour la notion du les Automates cellulaire et ces origines ce sont des modèles dynamiques permettant d'effectuer des simulations de grande envergure sur la base de règles simples.

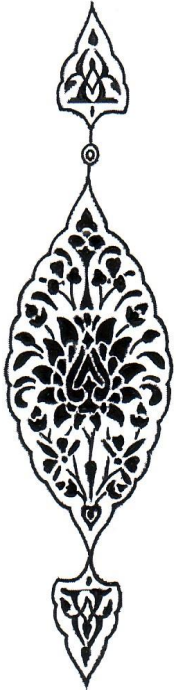
Le troisième chapitre expose la modélisation conceptuelle nous verrons comment on va faire la modélisation avec les automates cellulaires et comment créât et utilisé ces automates et aussi avec l'état de l'art.

Le quatrième chapitre est sur la ville de M'sila avec simulation détaillé on arrive à une visualisation d'un résultat approximatif pour l'avenir de la ville par l'analyse de la ville et aussi récolter diverses photos classées par ordre chronologique de la ville de M'sila et diverses informations sur le passé de la ville, pour arriver à un résultat qui permet de modéliser ce développement.

Enfin, le cinquième chapitre décrit le partie programmation de cette modélisation par automate cellulaire on utilisent le logiciel netbeans avec langage Java , Tandis que nous présentons les concepts particuliers développés , en particulier un langage simple qui permet à l'utilisateur de définir son propre modèle et les nouvelles fonctionnalités qui ont permis de construire un nouveau modèle que nous présentons . Nous terminons par la présentation du travail réalisé , la fabrication des données sources, la constitution de la base de règles du modèle d'évolution et quelques indications sur sa validation.

Chapitre I :

Evolution Urbaine





1.Introduction :

Dans ce chapitre on va parler sur l'évolution urbaine dans une manière générale et sur une perspective de long terme .Alors, l'urbanisation est un phénomène global qui puise ses racines dans l'histoire des populations humaines, qui s'accélère au fil des siècles et semble promis à une inexorable progression dans l'avenir. Il se manifeste par une augmentation continue de la population des zones urbaines, et corollairement par l'extension physique des agglomérations.

2. L'informatique urbaine :

L'informatique urbaine est une approche interdisciplinaire pour comprendre, gérer, et concevoir la ville en utilisant des théories et des méthodes systématiques basées sur de nouvelles informations. technologies de mations, et fondé sur les développements contemporains des ordinateurs et communications. Il intègre les sciences urbaines, la géomatique et l'informatique : urbanisme la science propose des études d'activités, de lieux et de flux dans l'espace urbain ; géomatique fournit la science et les technologies de mesure spatio-temporelle et dynamique objets urbains dans le monde réel et la gestion des données obtenues à partir de la measurement ; l'informatique fournit la science et les technologies du traitement de l'information, les systèmes d'information, l'informatique et les statistiques qui soutiennent la quête de développer des applications aux villes.

Le domaine couvre de nombreux secteurs qui définissent les systèmes de la ville. Ces secteurs sont souvent étudiés en tant que tels, tels que le transport, le logement, l'activité de vente au détail, infrastructure impliquant la distribution des déchets, de l'eau, de l'électricité et d'autres sources de l'énergie, ainsi que la structure démographique, la situation économique, le développement urbain, et une foule de perspectives connexes qui se rapportent aux villes et aux systèmes urbains. Ce qui rend une informatique urbaine différente et complémentaire de ces approches disciplinaires est le fait que le calcul est au cœur de la manière dont les méthodes et les modèles sont utilisés pour générer une compréhension plus profonde : de nombreux problèmes qui impliquent de déterminer comment fonctionnement des villes, comment elles génèrent des formes différentes, comment leur dynamique reflète manières dont ils grandissent et déclinent, et comment ils se mélangent, se séparent et se polarisent populations et activités différentes.

Ce qui fait de l'informatique urbaine un moyen particulièrement opportun de rassembler et fusionnant de nombreuses perspectives interdisciplinaires qui impliquent le calcul est que au cours des vingt dernières années, les ordinateurs se sont réduits au point de



pouvoir être utilisé comme capteurs et intégré dans une variété d'infrastructures physiques ainsi comme étant utilisé dans un contexte mobile par l'ensemble de la population. Cela a signifié que tout à coup, nous sommes maintenant dotés de flux de données sur le fonctionnement d'une ville en temps réel, ce qui n'était généralement pas disponible jusqu'alors lorsque la plupart de nos méthodes de collecte de données n'étaient pas automatisées au moyen de capteurs. Cela a conduit à ce que s'appelle le big data, c'est-à-dire des données générées en temps réel, avec une grande variété, et donc volume presque illimité. Ces données peuvent être le produit de capteurs qui fonctionnent continuellement et fournir des mises à jour immédiates au système qui nous concerne. Pour ces données, nous avons besoin de nouvelles méthodes et de nouveaux modèles pour nous aider à comprendre et à interpréter les anciennes des modèles toujours pertinents. Cela a jeté la ville 24 heures sur 24 à l'ordre du jour. Le temps se reflète maintenant profondément dans nos modèles, alors que dans le passé l'accent était davantage mis sur la variété spatiale.

Le domaine de l'informatique urbaine continue de se développer rapidement dans son étendue de nouvelles technologies de détection, nouveaux types de science des données spatiales, nouvelles méthodes d'analyse qui allant des méthodes statistiques traditionnelles comme dans l'économétrie spatiale, jusqu'à les nouveaux développements de l'apprentissage automatique et l'analyse multivariée qui permettent aux analystes explorer les méga données d'une manière qui n'a pas été possible jusqu'à présent. [4]

2.1. Comment l'évaluer

Le niveau d'urbanisation d'un territoire (région, pays, continent...) s'évalue par :

- le rapport entre le nombre des résidents urbains et celui des ruraux,
- la densité de peuplement des différentes zones,
- l'expansion territoriale des agglomérations,
- la transformation des modes de vie.

À noter que le terme d'urbanisation est à distinguer de celui d'urbanisme, qui désigne la façon dont les villes et espaces périurbains sont construits, transformés, aménagés et organisés.[3]

3.Mode d'urbanisation

La morphologie urbaine permet d'étudier les différentes formes d'urbanisation. Les villes peuvent se développer grâce à la ERP de façon verticale ou horizontale, voire les deux à la fois. Le développement horizontal est tantôt concentrique, dendritique, ou linéaire (fréquent



dans les vallées, ou sur le bord d'axes importants), ceci en fonction du contexte biogéographique, politique ou historique (incluant l'évolution des conditions historiques de propriété). L'urbanisme s'appuie généralement sur l'existant, sur le réseau de transport et sur un ou plusieurs centres ou pôles (développement multipolaire). De nombreuses villes nouvelles ont été créées dans les années 1960 en France à la suite de la politique des villes nouvelles (comme Lille-Est, Évry ou Cergy-Pontoise par exemple).

Hormis dans le cas de villes champignons liées à la découverte de filons d'or, de ressources rapidement épuisées, ou dans le cas de cités touchées par les retombées de Tchernobyl, depuis les années 1700, il est rare que les villes se stabilisent, disparaissent ou décroissent. Même Hiroshima et Nagasaki, ou les villes rasées durant la Première Guerre mondiale ou durant la Seconde Guerre mondiale, ou lors d'autres conflits ont rapidement été reconstruites et se sont développées. Ce n'est pourtant que dans les années 1970 avec les villes nouvelles, et dans les années 1990 que les urbanistes ont commencé à réfléchir aux conditions de soutenabilité du développement urbain. Et il faut attendre les années 2000 pour voir apparaître les premiers quartiers HQE (Bedzed par exemple à Londres) et 2006 pour le premier projet de ville HQE (en Chine).[6]

4.Géosimulation urbaine

La géosimulation est l'une des approches les plus utilisées pour la simulation urbaine. Les premiers balbutiements des simulations spatiales pour l'exploration de dynamiques urbaines sont quasi-conjoints à l'apparition de l'ordinateur, les analystes des problèmes urbains ayant rapidement décelé le potentiel de l'informatique pour décrire ou modéliser la ville [Ingram et al. 1972]. Ce type de modélisation urbaine à très grande échelle est par contre rapidement critiqué en raison notamment de la quantité astronomique de données requise, de leur résolution inadéquate, de leur manque de transparence et de la non-reproductibilité de leurs résultats [D. Lee 1973; D. Lee 1994; Torrens 2000b]. Depuis ce temps, des centaines de modèles de simulation urbaine ont été proposés, mais il a fallu attendre 1979 avec la simulation de croissance urbaine de Tobler [Tobler 1979] pour voir le couplage entre les automates cellulaires et espace urbain, et les années 1990 pour que cette association entre dans les mœurs, popularisée par certaines applications en géographie urbaine [Batty et al. 1997]. La notion de géosimulation urbaine est donc récente et représente une nouvelle tendance de simulation urbaine : la modélisation de systèmes à l'échelle des individus et des infrastructures [Waddell & Alberti 1998].

Le concept s'est imposé rapidement; à preuve que les applications à base de géosimulation ont été la principale forme de modélisation urbaine au cours des deux



dernières décennies [Stevens & Dragicevic 2007]. Les exemples abondent dans la littérature; ces applications touchent des domaines aussi variés que la simulation de piétons ou de foule [Batty 2001; Moulin et al. 2003; Kukla et al. 2003], la ségrégation [Nara & Torrens 2005; Omer & Benenson 2002], l'utilisation du sol et l'étalement urbain [Sanders et al. 1997; White et al. 1997; Batty et al. 1999; White & Engelen 2000; Shi & Pang 2000] et la simulation du trafic routier [Torrens 2000b; Nagel et al. 1999; Claramunt & Jiang 2001].

Ces dernières années, l'utilisation de la géosimulation pour résoudre les problèmes urbains a connu une expansion fulgurante, principalement en raison de l'essor des systèmes d'information géographique (SIG) et des bases de données spatiales [Benenson & Torrens 2004] ainsi qu'à la disponibilité de données géographiques de haute résolution en grande quantité et, généralement, accessibles à tous [Benenson & Torrens 2005]. On considère tout de même que les modèles de géosimulation n'en sont qu'à leurs débuts dans le domaine de la modélisation urbaine [Torrens 2001] en raison de toutes les possibilités qu'ils procurent, mais aussi du fait des nombreux défis qui les attendent.[5]

5. Urbanisation et développement durable

Pour un quadruplement de la population globale, celle des villes a augmenté d'un facteur 20. Les statistiques de l'ONU laissent augurer d'un nouveau doublement d'ici un siècle. Le processus d'urbanisation, par ailleurs, ne s'opère pas partout selon les mêmes modalités. Dans les pays riches et/ou très structurés, il est relativement encadré via des politiques d'aménagement du territoire. Au Sud, les migrations des populations rurales vers les villes échappent souvent à tout contrôle.

S'ensuivent des situations très hétérodoxes selon les cas :

Pour le positif : développement des industries, des services, des transports...

Pour le négatif : pollutions diverses, augmentation des émissions de GES et du réchauffement climatique, dégradation des milieux, ghettoïsation et déculturation de populations fragilisées...

Autant de problématiques qui questionnent les stratégies de développement durable et de résilience à l'échelle locale et à celle de la planète. Toutefois, il faut noter que si l'urbanisation pose de nombreuses questions en termes de durabilité, elle peut également représenter une opportunité pour nos sociétés d'être plus durables. En effet, on constate que globalement, dans les pays développés, les populations vivant en ville sont plus « durables » que celles qui vivent à la campagne : elles ont une empreinte carbone moins élevée, une empreinte sur le territoire moins forte. Les populations urbaines utilisent généralement moins

leur voiture, ils consomment moins d'énergie car ils possèdent des surfaces habitables plus faibles, sans compter les économies d'échelles que permettent de constituer des villes denses en termes d'empreinte au sol, d'économie circulaire...

C'est pourquoi de plus en plus de chercheurs estiment que pour faire la transition vers des sociétés durables, respectant l'écosystème, il faut généraliser des villes denses, basées sur les énergies renouvelables et les principes de l'urbanisme durable.[3]

6.Urbanisation dans le monde

Dans le monde, on observe un peu partout des phénomènes d'urbanisation. Généralement, l'urbanisation va de pair avec le développement économique industriel d'une région ou d'un pays. En quête d'un développement économique plus propice, de nombreuses populations se déplacent vers les villes.

Actuellement, plus de 70% de la population mondiale vit dans les villes, contre seulement 15% en 1900 ou 50% en 2007.[3]

7.Modélisation du système urbain

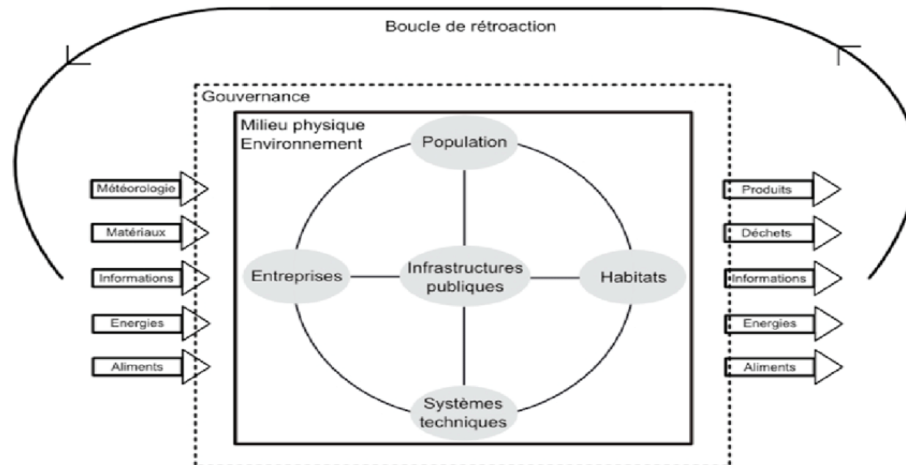


Figure I.1 : Modélisation du système urbain

Modélisation du système urbain La ville est un système ouvert. Il faut donc étudier la relation que la ville entretient avec son environnement. Par exemple, les relations entre la ville et la campagne sont très importantes et permettent à la ville d'assurer sa survie. Une ville développe des interactions entre les hommes, les activités et les biens, mais si l'intensité d'occupation du sol résultant des activités de la ville, des habitats, des infrastructures... - produit de la richesse et des équipements, elle produit aussi de la vulnérabilité et donc du risque. En considérant la ville comme un système, nous avons mis en évidence les



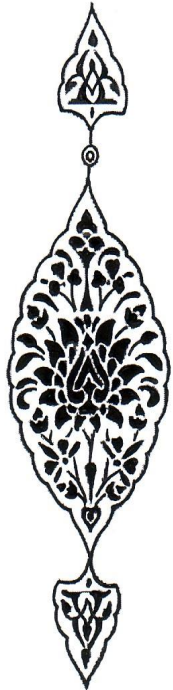
interrelations entre les différentes composantes urbaines. Il est donc intéressant d'étudier ces interrelations après une perturbation, en commençant par le modèle urbain productif. Ainsi, en étudiant différentes composantes urbaines et leur vulnérabilité au risque, il est possible de modéliser l'environnement urbain en temps de crise. Il apparaît ainsi que, compte tenu des contraintes de localisation et de structures, les réseaux constituent non seulement une « porte » des risques en milieu urbain, mais aussi une « porte » des risques du fait des effets domino que ces réseaux peuvent provoquer. [7]

8. Conclusion

Les modèles de simulation de développement urbain peuvent être des outils importants pour Aide à la décision car ces modèles permettent de mieux comprendre les processus morphologiques au travail, leurs principaux déterminants et leurs résultats. Elle peut également être intégrée à l'aménagement du territoire dans la mesure où elle permet de tester différents scénarios d'aménagement urbain. Dans un contexte où l'on cherche à réduire les investissements publics dans les infrastructures de transport et sous la pression de considérations environnementales de plus en plus importantes, l'impact de la restriction de certaines formes de mobilité sur la performance urbaine peut alimenter une réflexion plus approfondie sur la relation entre mobilité, formes bâties et évolution des systèmes urbains .

Chapitre II :

les automates cellulaires





1.Introduction

"... One might have thought that if a program was simple it should only do simple things. But amazingly enough, that isn't even close to correct. And in fact what I've discovered is that some of the very simplest imaginable computer programs can do things as complex as anything in our whole universe. It's this point that seems to be the secret that's used all over nature to produce the complex and intricate things we see..."

[... On aurait pu croire que si un programme était simple il ne devrait faire que des choses simples. Mais assez étonnamment, ce n'est même pas près de vrai. Et en fait ce que j'ai découvert que certains des très simples programmes d'ordinateurs imaginables peuvent faire des choses aussi complexes que quoi que ce soit dans l'ensemble de notre univers. C'est ce point qui semble être le secret qui est utilisé dans la nature pour produire la complexité et les choses complexes que nous voyons...] [Ma TRD].

C'était un extrait d'une discussion avec Stephen Wolfram, à propos du sujet de son livre " A new kind of science " , des règles extrêmement simples pouvaient alors émerger des structures beaucoup plus complexes.

Dans ce chapitre, nous venons introduire la notion d'automate cellulaire, par présentation un aperçu historique sur l'évolution de ce domaine de simulation utilisé aujourd'hui dans vaste filières de la physique, biologie, chimie, informatique.

Un automate cellulaire consiste en une grille régulière de « cellules » contenant chacune un « état » choisi parmi un ensemble fini et qui peut évoluer au cours du temps. L'état d'une cellule au temps $t+1$ est fonction de l'état au temps t d'un nombre fini de cellules appelé son « voisinage ». À chaque nouvelle unité de temps, les mêmes règles sont appliquées simultanément à toutes les cellules de la grille, produisant une nouvelle « génération » de cellules dépendant entièrement de la génération précédente.

Étudiés en mathématiques et en informatique théorique, les automates cellulaires sont à la fois un modèle de système dynamique discret et un modèle de calcul. Le modèle des automates cellulaires est remarquable par l'écart entre la simplicité de sa définition et la complexité que peuvent atteindre certains comportements macroscopiques : l'évolution dans le temps de l'ensemble des cellules ne se réduit pas à la règle locale qui définit le système. À ce titre il constitue un des modèles standards dans l'étude des systèmes complexes.

2.Les Automates cellulaires

Les automates cellulaires sont des modèles dynamiques permettant d'effectuer des simulations de grande envergure sur la base de règles simples [Carvalho et al.2006b; Langlois

& Phipps 1997]. En effet, malgré le fait qu'ils forment l'un des modèles spatiaux les plus simples, ils sont particulièrement adaptés pour la modélisation de systèmes complexes en raison de leur facilité à reproduire des comportements globaux complexes à partir des interactions locales de cellules individuelles [White & Engelen 2000; Wolfram 1984]. Pour cette raison, ils sont de plus en plus utilisés dans la simulation de systèmes naturels et humains complexes, et plus particulièrement en géosimulation, dont ils constituent l'un des fondements.

La popularité des automates cellulaires en géosimulation est due aux nombreux avantages que leur utilisation confère à ce type de simulation, notamment une grande simplicité à la fois dans la représentation visuelle et pour les traitements, une approche dynamique et flexible, la représentation explicite du temps et de l'espace [Moreno & Marceau 2007], une excellente compatibilité avec les systèmes d'information géographique (SIG) et les données raster (très disponibles) [White & Engelen 2000] ainsi qu'avec le paradigme de la programmation orientée objet et enfin un certain réalisme dans la simulation. Ceci fait de l'automate cellulaire un des modèles de simulation spatiale les plus établis, particulièrement pour les simulations urbaines.

Dans sa définition la plus basique, un automate cellulaire correspond à une grille composée de cellules identiques [O'Sullivan & Torrens 2000]. Au temps t de la simulation, chacune des cellules est dans un état E faisant partie d'un ensemble prédéterminé d'états. L'état d'une cellule est modifié du temps t au temps $t + 1$ par l'application d'un ensemble de règles internes tenant compte de l'état de la cellule et des cellules voisines. L'application répétitive de ces règles aux cellules de façon synchrone permet d'en changer les états de façon itérative et de le faire évoluer.

Si on le décortique, l'automate cellulaire traditionnel comporte donc cinq composantes:

- une grille de cellules carrées;
- un ensemble fini d'états permettant de définir les cellules;
- un voisinage uniforme pour chacune des cellules;
- un ensemble de règles de transition permettant de modifier les états des cellules;
- une dimension temporelle, chaque itération permettant de modifier les cellules simultanément.

Ce formalisme décrit l'automate cellulaire classique tel que défini à l'origine par Von Neumann [Von Neumann & Burks 1966] et qui demeure toujours d'actualité : cellules

régulières identiques, voisinage et règles de transition homogènes, mise à jour synchrone des cellules. Or, l'uniformité omniprésente dans la définition de base de l'automate en fait une approche difficile à appliquer dans le cadre de simulations de dynamiques urbaines réelles. En réalité, et tel qu'appliqué à la modélisation de systèmes urbains comportant des dimensions sociales, économiques et spatiales, la définition d'un automate cellulaire est beaucoup plus complexe [Torrens 2000a].

De nombreux assouplissements ont été proposés au fil de l'évolution de la géosimulation pour adapter les automates cellulaires à celle-ci. La pionnière en ce domaine demeure Couclelis [Couclelis 1985], qui fut la première à remettre en cause l'uniformité des automates cellulaires et plus particulièrement de deux de leurs composantes, soit le voisinage et les règles de transition. Depuis, plusieurs modifications ont été apportées aux automates cellulaires de façon à adapter ceux-ci au contexte de la géosimulation. La question de savoir si on doit s'éloigner du formalisme strict des automates cellulaires pour la géosimulation urbaine fait d'ailleurs encore l'objet de plusieurs débats [Torrens & O'Sullivan 2000].

Les sections ci-dessous détaillent les différentes composantes des automates cellulaires, la place qu'elles occupent dans un système de géosimulation ainsi que les assouplissements apportés au fil du temps pour tailler une place à cette approche en simulation urbaine et en géosimulation.

2.1. Grille

Dans un automate cellulaire, la surface représentant l'environnement virtuel est divisée en une partition de cellules de forme régulière, le plus souvent une grille en deux dimensions de cellules carrées, mais parfois aussi hexagonales [Sanders et al. 1997]. Plus rarement, les cellules peuvent être de forme irrégulière. On appelle tessellation spatiale ce morcellement de l'espace. Par définition, la tessellation d'une surface correspond au recouvrement de cette surface à l'aide d'un arrangement de polygones qui ne se chevauchent pas [Y. C. Lee et al. 2000]. Le recouvrement de la surface doit être complet, c'est-à-dire qu'il ne doit pas y avoir de vide entre les cellules.

L'expression « tessellation régulière » fait référence à une structure dont les polygones sont identiques et réguliers (figure dont tous les côtés sont de même longueur et tous les angles sont égaux); dans le cas contraire, il s'agit d'une tessellation dite « irrégulière » [Worboys & Duckham 2004].

Dans un système de géosimulation urbaine, la grille de cellules est considérée comme étant la structure spatiale de la simulation. Elle représente le territoire, l'environnement; bref, la structure physique de la ville modélisée [Torrens 2001]. Les cellules sont les éléments fondamentaux de la simulation; ce sont des automates individuels mais elles demeurent

fixes ;elles ne se déplacent pas.

La plupart du temps, les cellules sont identiques, malgré l'irrégularité marquée de la plupart des villes. Des cellules de tailles et de formes homogènes sont ainsi employées pour représenter des objets géographiques urbains aux formes irrégulières, telles que des parcelles cadastrales ou des zones d'utilisation du sol. Récemment, quelques rares systèmes de géosimulation à base d'automates cellulaires irréguliers [Stevens & Dragicevic 2007; Hammam 2004; Moreno, Ménard et al. 2008] ont fait leur apparition.

2.2. Etat

À chaque itération de la simulation, un état (discret) provenant d'un ensemble fini d'états est attribué à chacune des cellules. Cet état correspond à un attribut approprié selon le phénomène modélisé. Dans un contexte de simulation urbaine, l'état peut représenter par exemple le type d'occupation du sol (industriel, commercial ou résidentiel), l'occupation (occupé ou libre), la densité (haute, moyenne ou basse) ou le stade de développement (vacant ou construit).

Depuis peu, l'état est parfois remplacé par un ensemble de caractéristiques, permettant ainsi de mieux représenter le contexte étudié. Des états non discrets peuvent également être employés [X. Li & Yeh 2000], reflétant mieux la diversité des valeurs que peuvent prendre certaines caractéristiques urbaines telles que le taux de croissance de la population.

2.3. Voisinage

Le voisinage d'une cellule représente l'ensemble des régions qui ont une influence sur cette cellule [Shiyuan & Deren 2004; O'Sullivan 2001b]. Le concept de voisinage est basé sur la notion d'adjacence. Le voisinage de l'automate cellulaire traditionnel est composé des 4 cellules adjacentes aux côtés de la cellule (voisinage de Von Neumann) ou des 8 cellules adjacentes à la cellule (voisinage de Moore), que l'on peut observer sur la Figure 1 ci-dessous.

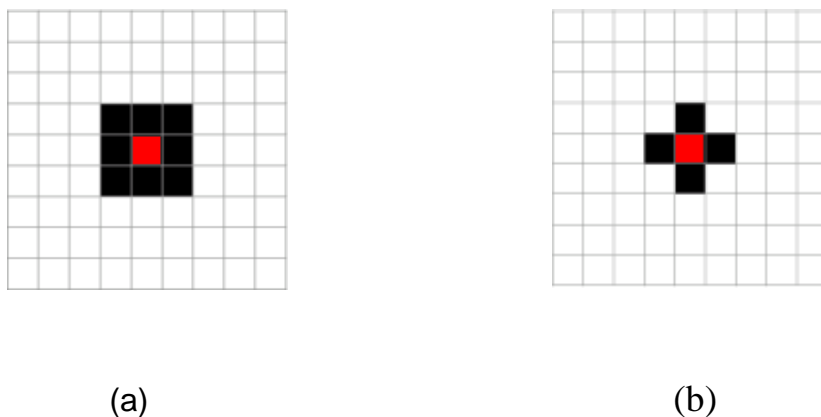


Figure II.1 : Voisinages de Moore (a) et de Von Neumann (b)



Dans un contexte urbain, les zones d'influence ne sont pas uniquement topologiques et font parfois référence à des notions de distance [Torrens 2000a]. De plus, dans le cas de systèmes comportant une dimension humaine, la notion de voisinage peut être très large, puisqu'une personne est consciente de son environnement dans un contexte beaucoup plus vaste que ce qu'implique la notion classique de voisinage [White & Engelen 2000]. Pour cette raison, certaines recherches ont défini des voisinages alternatifs, basés sur la distance ou la proximité [Stevens & Dragicevic 2007] ou encore sur la nature des objets [White & Engelen 2000].

2.4. Règles de transition

Les règles de transition forment le cœur, ou moteur, de la simulation; elles déterminent le comportement du modèle et l'évolution de la simulation [Dawson et al. 2006]. L'ensemble de règles synchrones gère la transition des états des cellules entre chacune des itérations.

Les règles se présentent sous la forme d'énoncés conditionnels qui déterminent l'état futur de chacune des cellules en tenant compte à la fois de l'état de la cellule et des valeurs des cellules voisines, soit celles faisant partie du voisinage de la cellule [Vliet et al. 2009].

Dans un contexte de géosimulation urbaine, une règle de transition peut représenter n'importe quel processus affectant une région urbaine. Par exemple, dans un système de géosimulation suivant l'accroissement urbain, une cellule peut devenir candidate pour une conversion de l'état « Vacant » à l'état « Développé » seulement si toutes les cellules de son voisinage ont un état correspondant à

« Très haute valeur foncière ». Dans le cas contraire, l'état de la cellule demeure « Vacant » [Torrens 2009].

Des principes novateurs ont récemment été introduits dans la description des règles de transition; citons notamment la logique floue [Carvalho et al. 2006b] ainsi que les systèmes stochastiques ou probabilistes.

2.5. Temps

Dans un automate cellulaire, le temps est discret et procède par évolution itérative, passant du temps t au temps $t + 1$, puis au temps $t + 2$, etc. La granularité de l'échelle de temps change selon le contexte : un intervalle de temps peut représenter aussi peu qu'une seconde ou une minute (modèles de simulation de trafic) mais aussi de plus grosses périodes de temps, par exemple un mois ou un an, dans les modèles d'étalement urbain. Cependant, l'échelle de temps doit demeurer réaliste, c'est-à-dire que l'on tiendra compte du temps dévolu à une itération pour déterminer ce qui évolue pendant celle-ci. À chaque itération, les règles de transition sont appliquées à l'ensemble des cellules de façon à faire évoluer leurs états.

C'est de cette façon que progresse la simulation.[5]

3. Définitions de base

Un AC se définit à l'aide de deux types de caractéristiques : structurelles et fonctionnelles . Les premières concernent l'aspect topologique du réseau cellulaire, les secondes concernent l'aspect dynamique de l'évolution du réseau au cours du temps. En règle générale, le réseau des cellules peut prendre corps dans des espaces à D dimensions, D étant une, deux ou trois dimensions ou encore plus. Théoriquement, il n'y a pas de limite à la dimension d'un automate, si ce n'est la puissance de calcul des machines sensées le reproduire. Par exemple, dans le cas d'une matrice à 2D, la structure du réseau cellulaire peut-être de deux types :

3.1. La structure en île : Les cellules du réseau sont virtuellement entourées par des cellules mortes.

3.2. La structure en tore : Les cellules du bord haut de la matrice peuvent contacter celles du bord bas, et de même pour les cellules des bords gauche et droit.

Le réseau cellulaire peut également être variable comme, par exemple, le réseau orthogonal ou hexagonal.

Dans un AC une cellule n'a conscience que d'un sous-ensemble de cellules dites voisines ayant une influence sur elle. On dit qu'un voisinage d'une cellule est aveugle si chacune des cellules le constituant joue un rôle identique, la cellule concernée n'aura donc connaissance que des différents états des cellules voisines sans savoir quel état correspond à quelle cellule. Ce type de voisinage est le plus souvent utilisé par la plupart des AC sans le préciser.

Le fonctionnement de chaque cellule du réseau peut être caractérisé par l'automate fini (V, v_0, f) .

- V est l'ensemble des états cellulaires.
- v_0 un état particulier appelé état de repos.
- f est la fonction de transition qui à chaque voisinage qui est n -tuple d'éléments de V associe un élément de V .

V étant l'ensemble des états que peut prendre une cellule. Le plus souvent limité à 2, mais il n'y a aucune limite à ce nombre, c'est le cas par exemple pour l'automate de Von Neumann qui était à 29 états. Dans la pratique, les états cellulaires sont souvent représentés par des couleurs ce qui permet de suivre l'évolution de l'automate. Comment l'évolution de tel automate aura lieu ?

La fonction de transition f est un ensemble de règles qui permettent de déterminer le nouvel état d'une cellule en fonction de son état précédent et de l'état précédent de son voisinage. Généralement, ces règles ne sont pas explicitées, mais résumées sous la forme de métarègles de type « *si...alors* ».

L'automate évolue discrètement par génération où le temps s'écoule par à-coups. Ceci signifie qu'à la génération t , chaque cellule décide d'après sa fonction de transition que devient son état au futur c'est-à-dire au temps $t+1$. Une fois chaque cellule a déterminé son prochain état, et seulement à ce moment là, elle passe au nouvel état calculé d'une façon à ce que le réseau cellulaire sera entièrement remis à jour de manière synchrone. On parle alors d'une simulation d'un traitement parallèle. Formellement, on peut exprimer l'évolution de l'automate par la formule .

$$S_i(t+1) = f(\{S_j(t)\}) \text{ où } j \in V_i \wedge V_i \text{ désigne le voisinage de la cellule } i$$

Figure II.2 : Règle de mise à jour d' AC

Un AC pouvait donc être défini par un aspect topologique décrivant la façon par laquelle les cellules sont arrangées sur le réseau cellulaire et un autre fonctionnel caractérisé par le voisinage, l'ensemble d'états et la fonction de transition qui décrit son évolution.[9]

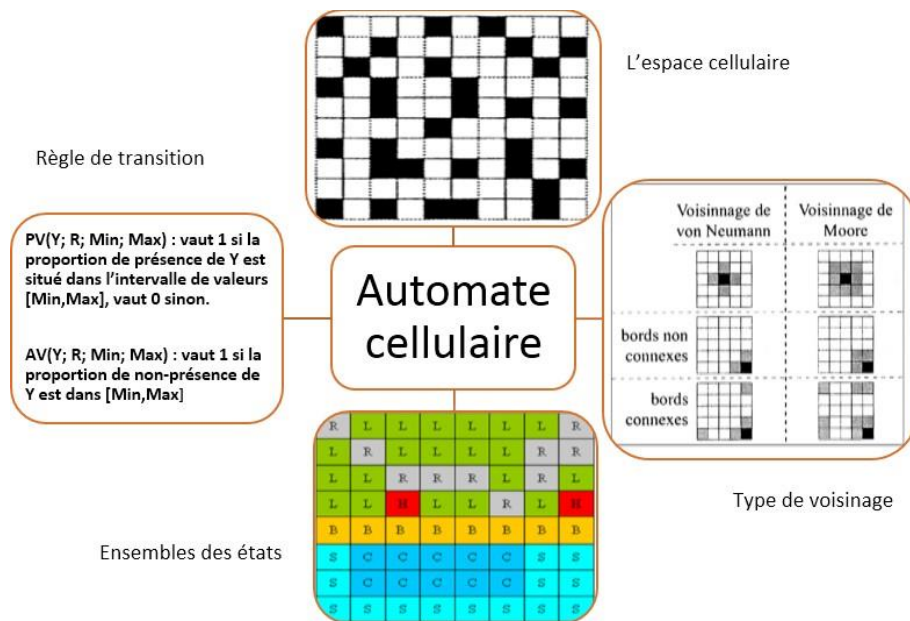


Figure II.3 : Composants d'un automate cellulaire



4. Définition 1

Un automate cellulaire est un tuple $A = (d, Q, V, \delta)$ ou :

- $d \in \mathbb{N}^*$ est la dimension de l'automate cellulaire, et indique que le réseau sous-jacent est \mathbb{Z}^d .
- Q est un ensemble fini d'états.
- $V \subset \mathbb{Z}^d$ est un sous-ensemble fini ordonné (appelé voisinage) du réseau sous-jacent \mathbb{Z}^d .
- $\delta : Q^V \rightarrow Q$ est la fonction de transition locale de l'automate.

La plupart des automates cellulaires traités dans cette thèse auront pour fonction de reconnaître des langages. Pour cette raison, on définit un alphabet d'entrée dans lequel seront exprimés les langages caractérisés par un automate cellulaire.[11]

5. Définition 2

D'un point de vue formel, un automate cellulaire géographique est défini par le quadruplet (U, V, E, F) avec :

- $U = \{U_1, U_2, \dots, U_i, \dots, U_n\}$, un ensemble fini d'unités spatiales, réparties le plus souvent selon un arrangement régulier (grille) ;
- $V = \{V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_n\}$, l'ensemble des voisinages de ces unités spatiales, définis selon un critère topologique (contigüité et/ou connexité) ou métrique (distances entre centroïdes). Chaque voisinage V_i est une liste d'unités spatiales $V_i = \{U_j, U_k, \dots, U_m\}$ considérées comme voisines de l'unité i , selon le critère retenu ;
- E , l'ensemble des états possibles des cellules, sous forme de variables qualitatives ou quantitatives, discrètes ou continues ;
- F , l'ensemble des fonctions de transition locales f , déterministes ou probabilistes, permettant de faire évoluer à chaque pas de temps t l'état des cellules en fonction de l'état de la cellule concernée et des états des cellules voisines, telles que $E_i^{t+1} = f(E_i^t; E_{V_i^t})$. [11]



6. Origines et développement

Dans les années quarante, le chercheur Von Neumann, père des architectures des ordinateurs actuels, a étudié les automates autoreproducteurs, le but fut de savoir s'il était possible de concevoir une machine capable de s'auto reproduire, c'est à dire produire une copie d'elle même. En effet, ce mécanisme correspond à l'interprétation actuelle du fonctionnement de la molécule d'ADN découverte plus tard. Etant donné que l'ADN n'était pas encore découvert au cours de cette période, Von Neumann souhaite alors mieux comprendre la logique qui sous-tend de tels phénomènes.

Von Neumann trouva son chemin pour résoudre le problème posé grâce aux travaux du mathématicien Stanislas Ulam, son collègue au laboratoire de Los Alamos. Ce dernier a étudié la génération des structures graphiques définies de façon récursive. La source étant des règles simples permettant d'engendrer des figures complexes et esthétiques pouvant par fois se répliquer. Il a utilisé un espace à deux dimensions divisé en « cellules ». Chacune d'entre elles pouvait avoir deux états : allumé ou éteint. Partant d'une configuration donnée, la génération suivante était déterminée en fonction des règles de voisinage. Il suggéra alors à Von Neumann d'utiliser ce qu'il appelait les « espaces cellulaires » pour pallier les difficultés pratiques qui se posaient lors de la construction de l'automate autoreproducteur.

Von Neumann a, tout de suite, construit son automate autoreproducteur, c'était un automate bidimensionnel à 29 états avec un voisinage de 5 cellules (cellule cible + 4 cellules voisines contiguës). Il a également décrit comment un constructeur universel pouvait être construit, c'est à dire une structure capable de générer n'importe quelle configuration stockée dans une structure de stockage.

Ce n'est qu'en 1966 que le terme automate cellulaire est créé par Arthur Burks en coïncidence avec la publication du premier grand ouvrage consacré au problème de l'autoreproduction : *Theory of self-reproducing automata*. Rappelons que dans les années soixante, quelques-uns des problèmes mathématiques ont été résolus par des AC comme celui de « **la synchronisation des fusiliers** » par exemple.

L'application des AC n'est élargie qu'après l'apparition du désormais fameux Jeu de la Vie (*Life*) de John Horton Conway en 1970. Nous n'allons pas l'aborder ici car il le sera par la suite. Beaucoup de chercheurs se sont intéressés à son fonctionnement plus tard afin de maîtriser les énigmes qui sont nées de son étude. Parallèlement aux recherches qui se déroulaient sur *Life*, d'autres chercheurs étudiaient d'autres AC ayant des règles simples et qui conduisaient aussi à des comportements imprévisibles. Plus tard, dans les années 80, les chercheurs se sont également dirigés vers la physique où les AC ont été utilisés comme modèles de simulation des comportements des molécules et d'autres phénomènes physiques.

Depuis le début des années 90, l'utilisation des AC s'est généralisée en touchant à de nombreux domaines, notamment la cryptographie, l'imagerie, l'étude du développement de systèmes urbains ... etc.[9]

7.Caractéristiques

7.1.Caractéristiques techniques d'un automate cellulaire

7.1.1.La cellule

L'élément de base d'un automate cellulaire (en abrégé AC) est la cellule. Une cellule est une sorte de mémoire qui permet de stocker un état. Dans le cas le plus simple, l'état d'une cellule est constitué d'un bit, chaque cellule pouvant donc se trouver soit dans l'état 1, soit dans l'état 0. Cependant, l'état d'une cellule peut être plus complexe et comporter plusieurs attributs, mais le nombre d'états possibles pour la cellule reste fini. L'automate auto-répliquant de Von Neumann admettait 29 états.

7.1.2.Le réseau

Les cellules sont disposées sur un réseau dont la géométrie est celle d'un réseau régulier de dimension n . Cependant, dans la plupart des cas, on choisit un réseau carré avec $n=1$ ou 2 . On peut construire des réseaux avec $n=3$, mais ceux-ci sont plus difficiles à visualiser. Les réseaux unidimensionnels sont plus faciles à étudier et permettent d'obtenir des résultats théoriques. La terminologie de site du réseau s'emploie aussi pour désigner une cellule du réseau. Le terme site présuppose une appartenance et une localisation sur un réseau.

7.1.3.Le voisinage

La dynamique d'un automate cellulaire nécessite la définition de la notion de voisinage d'une cellule: c'est l'ensemble des cellules susceptibles d'interagir avec elle à un temps donné. Le voisinage contient toute l'information nécessaire pour la mise à jour de l'état de la cellule à chaque pas de temps. Il détermine donc l'évolution temporelle de la cellule. Précisons qu'une cellule appartient à son propre voisinage. Les voisinages les plus répandus sur un réseau bidimensionnel carré sont:

- Le voisinage de von Neumann (ci-dessous figure (a)) d'une cellule contient les quatre cellules nord, sud, est, ouest.
- Le voisinage de Moore (ci-dessous figure (b)) étend le voisinage de von Neumann en y adjoignant les cellules sur les diagonales.

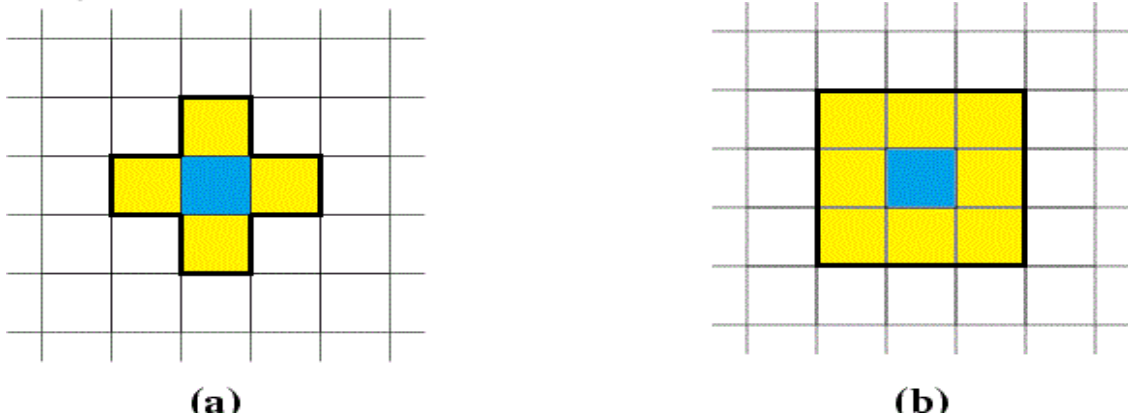


Figure II.4 : voisinage de Von Neuman et de Moore

- Le voisinage de Moore étendu (ci-dessous figure (a)) est similaire au voisinage de Moore, mais on y incorpore aussi la deuxième couche de cellules.
- Le voisinage de Margolus (ci-dessous figure (b)) nécessite un partitionnement du réseau en blocs adjacents de 2×2 cellules. La règle d'évolution dépend de la position de la cellule au sein d'un bloc, soit supérieur-droit, supérieur-gauche, inférieur-droit, inférieur-gauche. Le partitionnement du réseau change, lorsque la règle est itérée, en alternant entre une partition paire et une partition impaire.

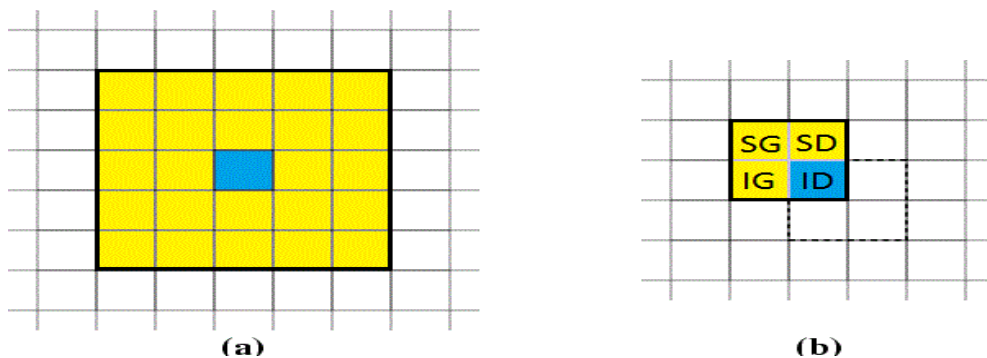


Figure II.5 : voisinage de Moore étendu et de Margolus

- On peut établir de plusieurs manières une correspondance entre un réseau hexagonal et un réseau carré. Le voisinage hexagonal est alors envoyé sur un sous-ensemble de six cellules du voisinage de Moore. On énumère les possibilités en considérant le voisinage de von Neumann auquel on adjoint: soit une diagonale (ci-dessous figure (a)), soit les deux voisins nord-est et nord-ouest, nord-est et sud-est, sud-ouest et nord-ouest (ci-dessous figure (b)), ou bien sud-est et sud-ouest.

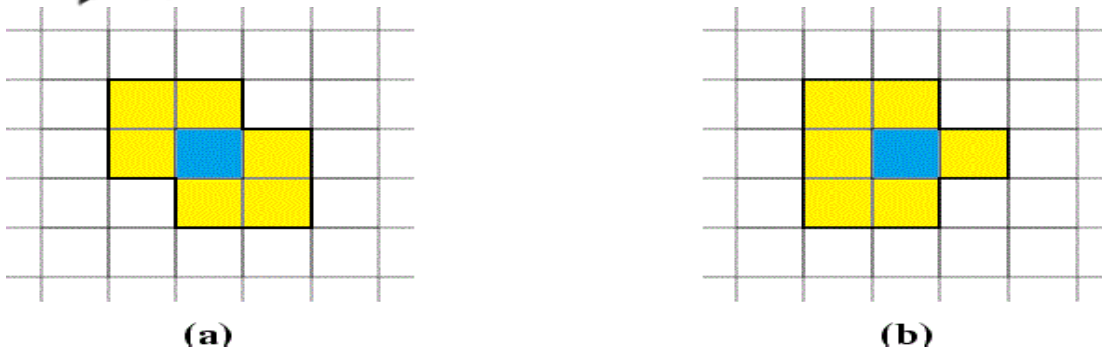


Figure II.6 : variation de voisinage de Von Neuman

7.1.4. conditions aux bords

En pratique, le nombre de cellules du réseau est bien évidemment fini. Il faut alors préciser la notion de voisinage pour les cellules aux bords du domaine. L'information concernant la localisation d'une cellule est codée dans la cellule même. Une règle d'évolution différente devrait être appliquée aux cellules de bord. En réalité, plutôt que de définir une règle différente sur les bords, on étend le voisinage des cellules de bord. On définit alors plusieurs conditions aux bords (figure ci-dessous):

Périodiques: En dimension deux, cela signifie que les bords gauche et droite, ainsi que supérieur et inférieur sont connectés. Le domaine peut alors être vu comme un tore.

Fixes: Le voisinage est complété avec des cellules dont l'état est fixe.

Adiabatiques: Le voisinage est complété en dupliquant la cellule.

Symétriques: Le voisinage est complété en dupliquant la cellule du voisinage dans la direction opposée.

C'est souvent la nature du système étudié qui dicte le choix de la condition aux bords.



Figure II.7 : voisinage des cellules de bord.

7.3. La règle d'évolution

La dynamique est décrite à l'aide d'une règle d'évolution. La principale source de variété dans l'univers des automates cellulaires est le grand nombre de règles potentielles. La règle d'évolution permet de déterminer l'état d'une cellule au pas de temps suivant comme une fonction de l'état des cellules de son voisinage. En fait, si K est le nombre d'états possibles de



chaque cellule et m le nombre de cellules de son voisinage, il existe K^m règles possibles. Pour un automate binaire avec le voisinage de von Neumann (où $m=5$), il existe donc plus de 4×10^9 règles possibles. Avec le voisinage de Moore (où $m=9$), il en existe environ 10^{154} .

Une règle est donc une fonction

$$f: \{1, \dots, k\}^m \rightarrow \{1, \dots, k\}$$

Les règles possibles pour définir un automate cellulaire sont très nombreuses, même avec un petit nombre d'états et un petit voisinage :

| | 2 états | 3 états | 4 états | 5 états |
|------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------|
| 2 Voisins | 8 | 19 683 | 4 294 967 296 | $> 10^{17}$ |
| 3 Voisins | 256 | 7 625 597 484 987 | $> 10^{32}$ | $> 10^{57}$ |
| 4 Voisins | 65 536 | $> 10^{32}$ | $> 10^{154}$ | $> 10^{436}$ |
| 5 Voisins | 4 294 967 296 | $> 10^{115}$ | $> 10^{616}$ | $> 10^{2184}$ |
| 6 Voisins | $> 10^{19}$ | $> 10^{347}$ | $> 10^{2466}$ | $> 10^{10921}$ |

nombre de règles possibles selon nombre de voisin et nombre d'états

7.2. Caractéristiques fonctionnelles d'un automate cellulaire

On peut tirer de ce qui précède 5 notions essentielles à la compréhension du fonctionnement d'un automate cellulaire:

7.2.1. Le voisinage

A chaque génération, le nouvel état de chaque cellule est déterminé à partir de sa position spatiale dans l'univers de l'automate. C'est en fonction des états (allumé/éteint ou vivant/mort) des cellules voisines à $t+n$ que le nouvel état n d'une cellule est défini. Les transitions d'un état à l'autre de l'automate se font localement pour chaque cellule

7.2.2. Le parallélisme

Toutes les cellules constituant l'univers de l'automate sont mises à jour de manière simultanée et synchrone, leur transition de l'état $t+(n-1)$ à l'état $t+n$ se produisant en même temps.

7.2.3. Le déterminisme

Pour une cellule, la donnée des états des cellules voisines détermine à elle seule le nouvel état. Certains automates cellulaires dits stochastiques introduisent un facteur probabilité dans la transition : une même configuration de voisinage pourra conduire à différentes nouvelles configurations.



7.2.4.L'homogénéité

Toutes les cellules de l'automate utilisent les mêmes règles de transition pour déterminer leur état suivant.

7.2.5.La discrétisation

Un automate cellulaire se déroule dans le temps de manière discrète, c'est à dire en opposition avec la plupart des phénomènes physiques se déroulant de façon continue. Le temps de l'univers d'un automate avance par saut ($t+0, t+1, \dots, t+n$) génération après génération.[12]

8.propriétés

8.1.L'autoreproduction

La notion d'autoreproduction à la description de la dynamique d'un système social et vivant, est introduit par la recherche de VON NEUMANN– qu'aboutit à la formulation d'un premier AC qui était animée précisément par le désir de concevoir une « machine autoreproductrice »: le «kinématon » avec 29 états.

VON NEUMANN découvrit d'autre part que tout système autoreproducteur, pour sortir d'une impasse logique, devait nécessairement consister en un constructeur-copieur universel, capable non seulement de construire un quelconque objet – y inclus soi-même –, en partant d'une description et mettant à son usage les objets de son monde, mais également de distinguer entre une phase d'interprétation de sa propre description et une deuxième phase de copie de cette description même; une distinction aucun triviale pour un automate mathématique abstrait. Notons que, étonnamment, le principe du constructeur-copieur universel correspond à celui du processus biologique de la méiose, découvert deux ans plus tard.

C'est en 1966 que von Neumann réussit à démontrer la possibilité de construire un tel constructeur copieur universel au sein d'un automate cellulaire. Des recherches ultérieures sont démontré que l'ordre de grandeur d'un système autoreproducteur concret, réalisant une telle « machine » au sein d'un AC du type du Jeu de la Vie serait de l'ordre de 10cellules organisées d'une façon complexe et précise. Cet ordre de grandeur fut alors désigné comme « seuil de complexité » en deçà duquel l'autoreproduction n'est point possible.

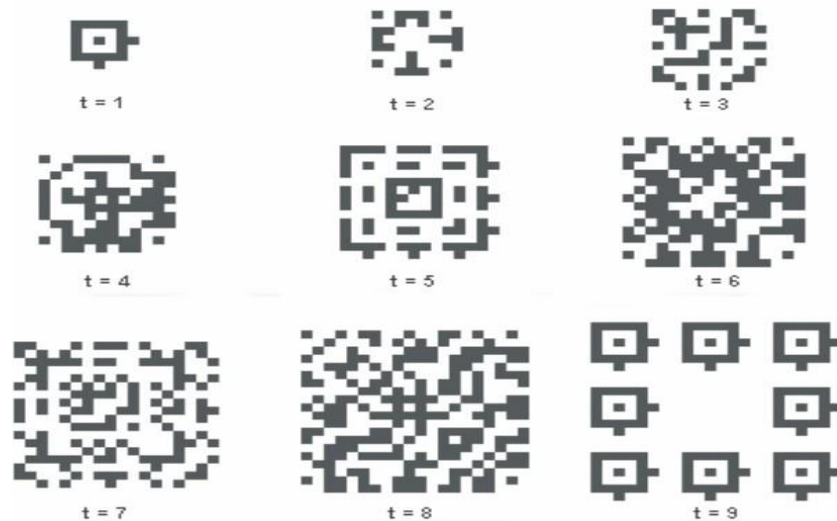


Figure II.8 : propriété de reproduction

8.2.L'auto-organisation

L'auto-organisation apparaît lorsqu'on partant d'un état initial aléatoire où chaque cellule a une chance égale d'être dans l'état vivant ou mort. Au bout de quelques pas de temps, ou pour reprendre la terminologie consacrée, au bout de quelques générations, les simulations montrent que l'état du système a perdu son aspect aléatoire. Il comporte des zones totalement mortes, des îlots stables de cellules vivantes, alors que d'autres restent en évolution .

8.3.L'invisibilité

On appelle automate inverse l'automate qui permet de revenir aux états précédents. Un exemple simple d'automate inverse est celui de l'automate déplacement Est. Chaque case peut avoir deux états, 0 et 1 (vide ou plein). L'automate regarde l'état de la case voisine Ouest, s'en souvient et agit en le prenant pour nouvel état de la case. Un réseau d'automates Déplacement Est sur un plan a pour effet, d'une génération à l'autre, de déplacer d'une case vers l'Est le motif initial. Son inverse est l'automate Déplacement Ouest.

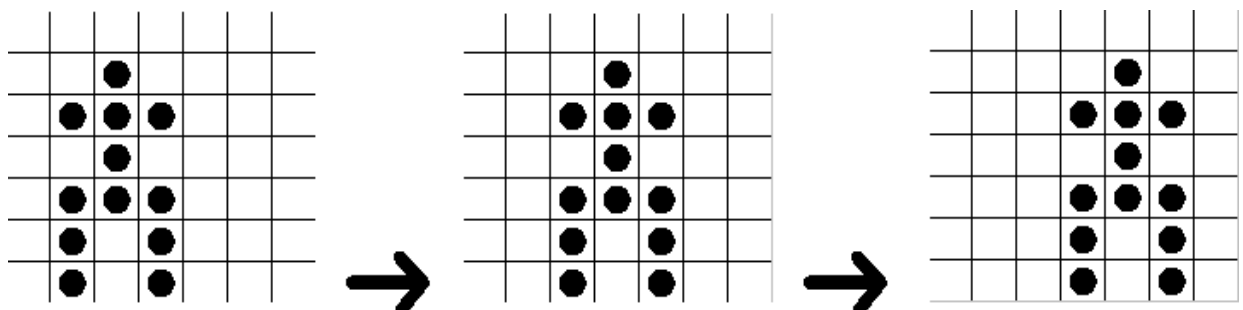


Figure II.9 : l'automate déplacement Est

Cet automate possède deux états : 0 et 1, représentés l'un par une case blanche, l'autre par une case noire. D'une génération à l'autre, chaque automate du réseau regarde l'état de son voisin Ouest et le prend pour lui-même. Le résultat est que le dessin se déplace vers l'Est.



On a démontré que tous les automates n'ont pas nécessairement un inverse. Pour démontrer qu'un automate n'a pas d'inverse il suffit de trouver deux configurations différentes qui aboutissent à la même configuration.

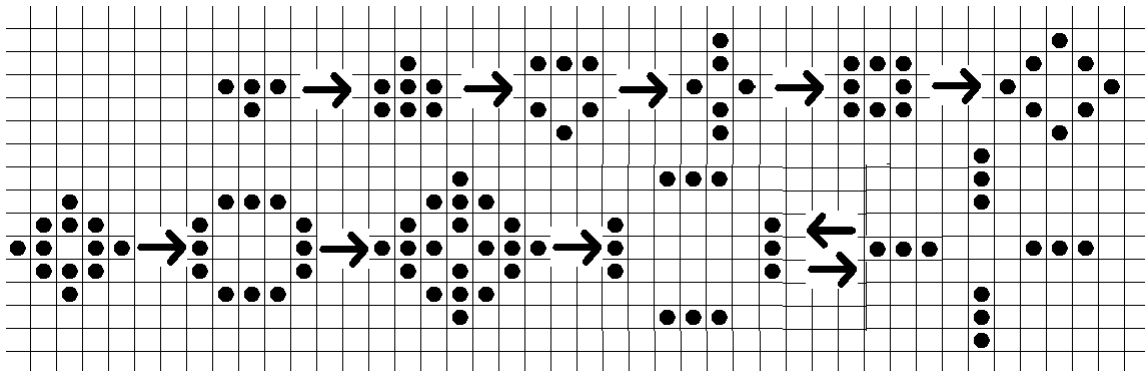


Figure II.10 : automate de type jeu de la vie

Cet automate, utilisant les règles du jeu de la vie, commence par un pentamino et évolue en 11 étapes. Au bout de la onzième l'étape 12 est la même que la dixième. On a donc deux configurations différentes qui donnent la même : l'automate de Conway (qui est celui du jeu de la vie) n'est pas inversible.

La question qui se pose alors est, lorsqu'on a construit un automate, de savoir si celui-ci est inversible. Et bien cette question est un problème indécidable.

8.4.L'indécidabilité

L'une des caractéristiques importantes des automates cellulaires est le caractère d'indécidabilité qui touche nombre de leurs propriétés. Ainsi, déterminer si un automate cellulaire possède un inverse est indécidable : il ne sera jamais possible d'écrire un programme prenant en paramètres un automate quelconque et pouvant décider si oui ou non cet automate possède un inverse. De la même façon, l'« avenir » d'un automate est indécidable. On n'a pas de méthode générale permettant de déterminer si un automate ne va pas s'éteindre au bout d'un certain nombre de générations ou s'il va se stabiliser.

8.5.Emergence

Exprime l'apparition des propriétés nouvelles qui apparaissent du fait de l'agrégation d'éléments au sein d'un ensemble, en opposition totale avec les théories.[12]



9. Terminologie

Nous avons choisi quelques concepts de base que la plupart des AC se partagent :

- Voisinage : Pour chaque cellule le passage d'un état à un autre est déterminé en examinant les états des cellules voisines. Seules les interactions locales sont permises entre les cellules.
- Parallélisme : Toutes les cellules constituant le réseau cellulaire de l'automate sont mises à jour de manière simultanée et synchrone.
- Déterminisme : Un AC est dit déterministe si sa fonction de transition est une fonction classique c'est-à-dire une même entrée donne lieu toujours à la même sortie, donc la donnée des états des cellules voisines détermine à elle seule le nouvel état d'une cellule. Certains AC dits stochastiques introduisent un facteur de probabilité dans leurs fonctions de transitions en faisant intervenir des variables aléatoires, donc une même entrée peut donner lieu à plusieurs sorties différentes, en d'autre terme l'évolution d'une configuration par une même fonction de transition n'est pas toujours la même.
- Homogénéité : On dit qu'un AC est homogène s'il satisfait les conditions suivantes :
 - La topologie du réseau cellulaire est régulière.
 - La fonction qui calcule le voisinage doit être uniforme pour toutes les cellules.
 - L'évolution de l'automate se définit par une seule règle de transition qui s'applique à toutes les cellules.
- Discrétisation : Un AC s'évolue dans le temps de manière discrète, c'est-à-dire génération après génération, ce qui s'oppose avec nombreux phénomènes physiques continus.[9]
-

10. Le jeu de la vie

Il faut préciser que le jeu de la vie n'est pas vraiment un jeu au sens ludique, puisqu'il ne nécessite aucun joueur ; il s'agit d'un automate cellulaire, un modèle où chaque état conduit mécaniquement à l'état suivant à partir de règles préétablies.

Le « jeu de la vie » est un automate cellulaire bidimensionnel où chaque cellule peut prendre deux valeurs (« 0 » ou « 1 », mais on parle plutôt de « vivante » ou « morte ») et où son état futur est déterminé par son état actuel et par le nombre de cellules vivantes parmi les huit qui l'entourent :

- Si la cellule est vivante et entourée par deux ou trois cellules vivantes, elle reste en vie à la génération suivante, sinon elle meurt.
- Si la cellule est morte et entourée par exactement trois cellules vivantes, elle naît à la

génération suivante.

En apparence simples, ces règles font émerger une forte complexité.

On peut sur le même principe imaginer un grand nombre de règles en faisant varier les seuils de naissance ou de survie, ou en ajoutant des états supplémentaires, etc. Parmi ces variations, on peut citer :

- Day & Night.
- HighLife.
- Immigration.
- QuadLife.

Certains ne prennent en compte pour déterminer les changements d'état d'une cellule que les voisins immédiats de la case considérée, mais d'autres prennent également en compte l'état des cellules voisines dans un rayon de deux cases, voire plus. D'autres attribuent aussi un poids plus important à certaines cases du voisinages qu'à d'autres (WeightedLife).[9]

10.1.Survie

Toute cellule ayant exactement deux ou trois cellules voisines survit à la génération suivante.



Figure II.11 : règle de survie dans jeu de la vie

10.2.Mort

Toute cellule ayant quatre cellules voisines ou plus meurt par étouffement à la génération suivante. Une cellule isolée ou n'ayant qu'une seule cellule voisine meurt d'isolement à la génération suivante.

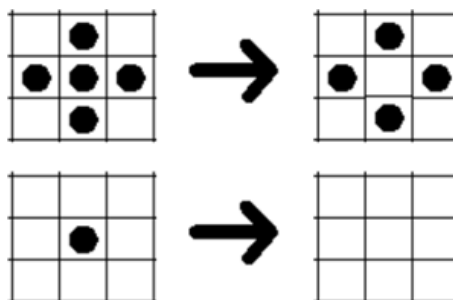


Figure II.12 : règle de mort dans jeu de la vie

10.3.Naissance

Sur une case vide comportant exactement trois cellules voisines, il naît une cellule à la génération suivante



Figure II.13 : règle de naissance dans jeu de la vie

10.4.Règles de jeu de vie

Le jeu se déroule sur une grille à deux dimensions, théoriquement infinie (mais de longueur et de largeur finies et plus ou moins grandes dans la pratique), dont les cases qu'on appelle des « cellules », par analogie avec les cellules vivantes peuvent prendre deux états distincts : « vivantes » ou « mortes ».

Ici, nous travaillerons sur un tore : il n'y aura pas de bords. Sur notre grille, la première colonne sera voisine de la dernière et la première ligne sera voisine de la dernière.[13]

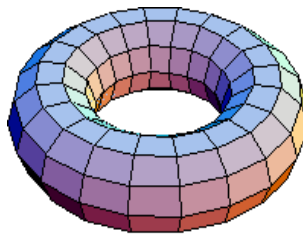


Figure II.14 : jeu de vie

À chaque étape, l'évolution d'une cellule (la case bleue ci-dessous) est entièrement déterminée par l'état de ses huit voisines de la façon suivante (les cellules vivantes sont les cases noires) :



| | |
|--|---|
| | <p>Si une cellule a moins de deux voisines vivantes, elle mourra à l'étape suivante.</p> |
| | <p>Si une cellule a plus de trois voisines vivantes, elle mourra à l'étape suivante.</p> |
| | <p>Si une cellule morte a exactement trois cellules vivantes comme voisines, elle renaîtra à l'étape suivante.</p> |
| | <p>Si une cellule (morte ou vivante) a exactement deux voisines vivantes, elle restera dans son état actuel à l'étape suivante.</p> |

10.5. Exemple de jeu de la vie

montre l'évolution de quelques configurations simples. Le lecteur pourra s'amuser à suivre à la main sur du papier quadrillé, ou à programmer, l'évolution d'autres configurations. En général, la plupart des configurations évoluent assez rapidement vers un ensemble de configurations attractrices simples: carrés, nids d'abeille, feux clignotants.

La configuration du planeur est assez remarquable: on la retrouve identique à elle-même, à une translation près, après quatre itérations. C'est l'un des ingrédients de base pour la construction d'un véritable "ordinateur cellulaire". Avant d'indiquer les principes de base de cette construction, donnons-en les motivations. Une manière d'étalonner la richesse des comportements dynamiques d'un système consiste à démontrer son équivalence formelle avec une machine de Turing, ou calculateur universel, dont les performances sont bien établies. Pour construire une machine de Turing il suffit de savoir construire deux fonctions logiques, dont la négation. Notre ordinateur cellulaire est donc basé sur les éléments suivants:

- Les planeurs, jouant le rôle d'un signal binaire se propageant à vitesse constante le long de diagonales du réseau. La présence d'un planeur s'interprète comme un signal 1, son absence comme un 0.
- La configuration "canon" expulse des planeurs à intervalles réguliers (toutes les trente itérations). Grâce à elle nous disposons d'un signal à l'état 1.
- La collision de deux planeurs les détruit tous les deux.

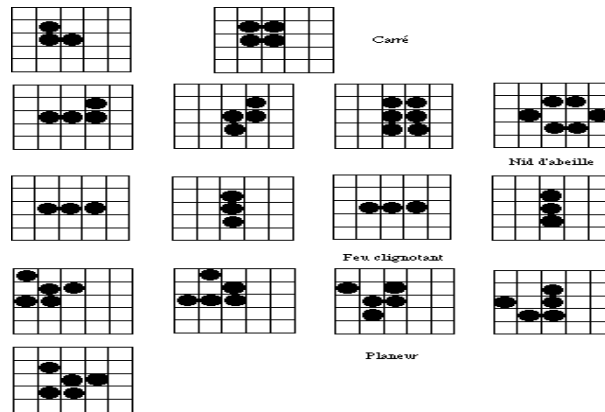


Figure II.15 : exemple de jeu de la vie

Evolution de quatre configurations. Le temps varie de gauche à droite.

Les deux premières configurations évoluent vers des points fixes, la troisième vers un attracteur de période deux; la quatrième est un planeur, qui se reproduit identique à lui-même à une translation d'un carreau près (vers le bas et vers la droite), après quatre itérations.[13]

La figure montre l'évolution d'une exécution du jeu de la vie sur une configuration torique 50 x 50

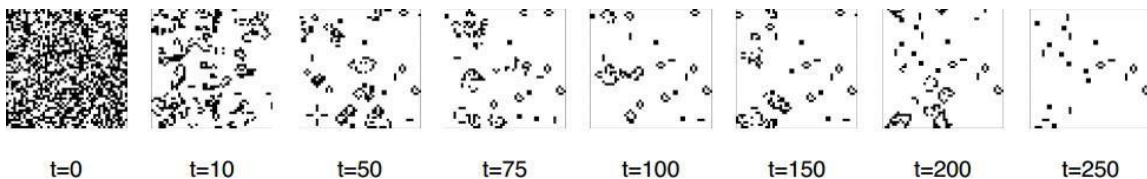


Figure II.16 : exemple de jeu de la vie

11. Classification de WOLFRAME

Il s'agit d'une des premières et sans doute de la plus connue des classifications d'automates cellulaires. Elle est basée sur des expériences, c'est à dire en fait sur l'observation d'extraits de diagrammes espace-temps d'automates à partir de segments initiaux tirés aléatoirement. À partir de là, Wolfram a explicité ([Wol84]) une division en quatre classes disjointes :

- Les automates évoluent vers une même configuration uniforme.
- Différentes structures, mais stables ou périodiques émergent toujours.
- Le comportement est plus compliqué, semble aléatoire, mais avec des motifs qui se répètent.
- Apparition de motifs simples mais ayant des interactions, et donc un comportement global complexe.



Cette classification a des limites évidentes, en premier lieu l'absence d'un formalisme qui permette de se poser réellement pour un automate donné la question de son appartenance. Cette absence fait aussi que même pour les automates les plus petits, bien connus, la classe n'est pas toujours évidente.

Des tentatives ont bien été faites pour formaliser ces classes, en particulier [CY88], mais toutes présentes des limites.

Cependant, cette classification a d'abord le mérite de chercher à distinguer différents types de comportements en fonctions de l'évolution à relativement long terme des AC. Et surtout, elle se base sur l'observation du comportement des automates à partir de configurations aléatoires. On est ici à l'opposé de la construction à priori de structure. On cherche à identifier de la structure qui apparaisse de manière visible, c'est à dire fréquemment, dans des diagrammes espace-temps partiels des automates. [12]

Enfin elle a motivée toute une série de propositions de classifications qui ont été développées par la suite.

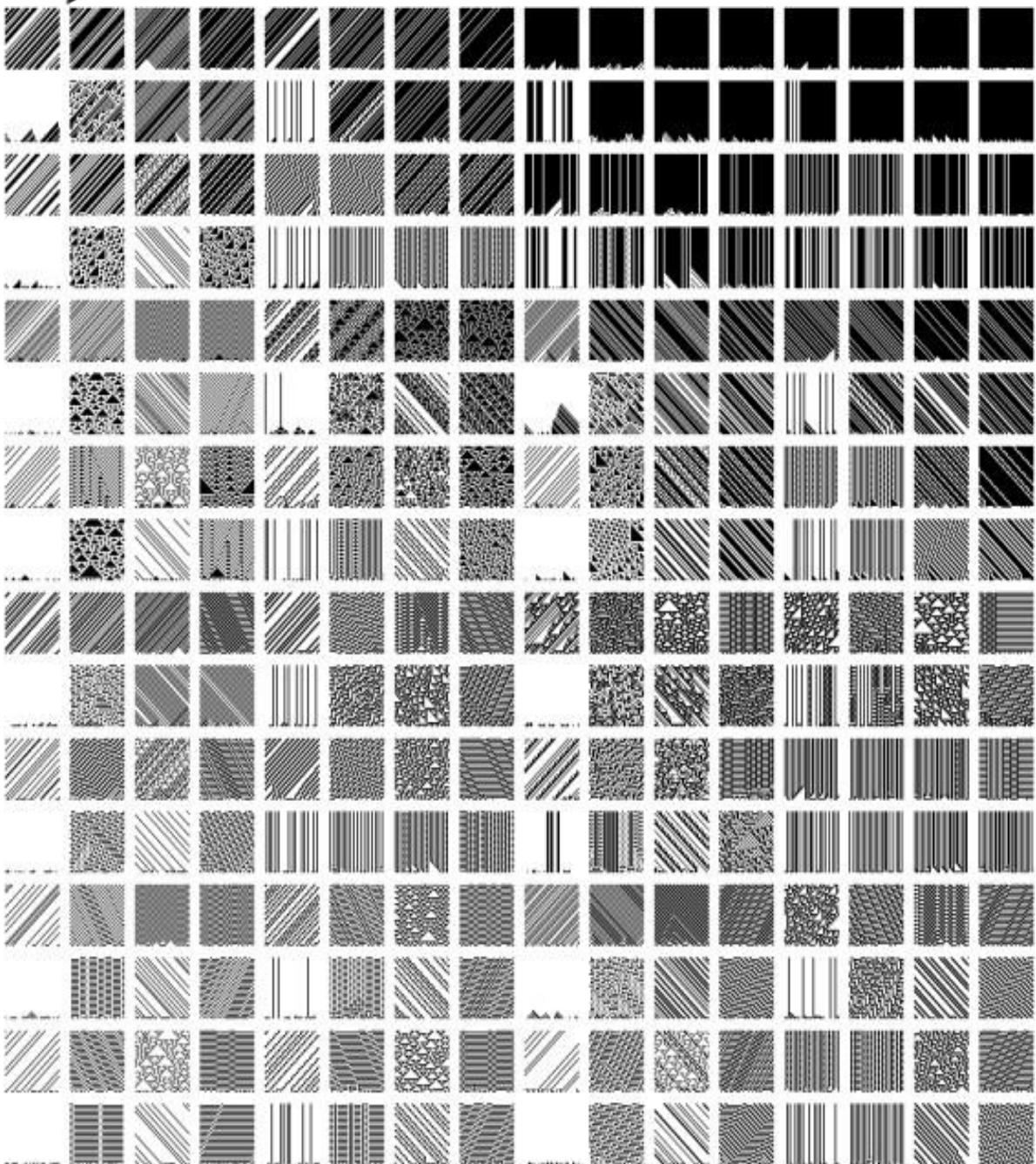


Figure II.17 : les 256 automates de Wolframe

11.1. Classe I

évolution vers un état fixe et homogène (par exemple la grille complètement vierge ou encore complètement couverte de pions) (dynamiques locales ordonnées de façon homogène). Les automates (0, 4, 16, 32, 36, 48, 54, 60 et 62) sont des exemples de ce type de classe.



11.2. Classe II (régulier)

évolution vers des structures stables ou périodiques (il peut y avoir des structures locales qui oscillent entre deux états différents, insérées dans ne structure globalement stable) (dynamiques locales ordonnées de façon cyclique). Les automates (8, 24, 40, 56 et 58). Sont des exemples de ce type de classe.

11.3. Classe III (chaotiques)

L'évolution conduit à des configurations chaotiques. Tous les états possibles initiaux conduits à aperiodiques ("chaotique") modèles. Après un nombre suffisamment grand pas de temps, les propriétés statistiques de ces modèles sont généralement les mêmes pour presque tous les états initiaux. En particulier, la densité des sites non nuls tend généralement à une valeur fixe non nulle. Les automates (2, 10, 12, 14, 18, 22, 26, 28, 30, 34, 38, 42, 44, 46 and 50) sont des exemples de ce type de classe.

11.4. Classe IV

évolution vers un système complexe ou des structures émergent (comme dans le jeu de la vie ou on trouve par exemple des planeurs et des possibilités de simuler une machine de Turing) (dynamiques complexes à mi-chemin entre les dynamiques ordonnées et désordonnées) . Les automates (52 et 110) Sont des exemples de ce type de classe.

12. Les automates cellulaires

L'automate cellulaire non-trivial le plus simple que l'on puisse concevoir consiste en une grille unidimensionnelle de cellules ne pouvant prendre que deux états (« 0 » ou « 1 »), avec un voisinage constitué, pour chaque cellule, d'elle-même et des deux cellules qui lui sont adjacentes.

Chacune des cellules pouvant prendre deux états, il existe $2^3=8$ configurations (ou motifs) possibles d'un tel voisinage. Pour que l'automate cellulaire fonctionne, il faut définir quel doit être l'état, à la génération suivante, d'une cellule pour chacun de ces motifs. Il y a $2^8=256$ façons différentes de s'y prendre, soit donc 256 automates cellulaires différents de ce type.

Chapitre II : LES AUTOMATES CELLULAIRES

Les automates de cette famille sont dit "élémentaires". On les désigne souvent par un entier entre 0 et 255 dont la représentation binaire est la suite des états pris par l'automate sur les motifs successifs 111, 110, 101, etc.

À titre d'exemple, considérons l'automate cellulaire défini par la table suivante, qui donne la règle d'évolution :

| | | | | | | | | |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Motif initial | 111 | 110 | 101 | 100 | 011 | 010 | 001 | 000 |
| Valeur suivante de la cellule centrale | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |

(cela signifie que si par exemple, à un temps t donné, une cellule est à l'état « 1 », sa voisine de gauche à l'état « 1 » et sa voisine de droite à l'état « 0 », au temps $t+1$ elle sera à l'état « 0 ».)

Si l'on part d'une grille initiale où toutes les cellules sont à l'état « 0 » sauf une, on aboutit à :

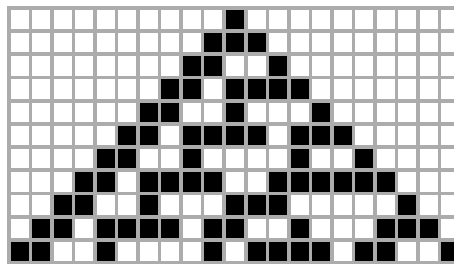


Figure II.18 : automote cellulaire

où chaque ligne est le résultat de la ligne précédente.

Par convention cette règle est nommée « règle 30 », car 30 s'écrit 00011110 en binaire et 00011110 est la deuxième ligne du tableau ci-dessus, décrivant la règle d'évolution.[9]

13. Domaine d'application

L'idée principale est d'effectuer un modèle discret de l'Univers, plus facile à gérer qu'un modèle continu. Une représentation simpliste en celle des éléments finis, avec un découpage vraiment élémentaire .

Voici un panorama des motivations qui expliquent le succès du modèle automate cellulaire :

13.1. en physique :

dans un automate cellulaire, tous les calculs résultent de l'application de règles locales – ceci correspond tout à fait aux présupposés usuels de la physique : invariance des lois de la physique par déplacements spatiaux, et invariance des lois de la physique par

déphasage temporels, (le troisième principe de la physique étant l'isotropie : l'invariance par rotation !). Dans un automate cellulaire, le fait que toutes les transformations soient locales, induit qu'aucune information ne peut se déplacer dans un automate cellulaire plus vite que la loi d'évolution locale ne le permet. Autrement dit, dans un automate cellulaire, la notion de localité induit une notion de vitesse de la lumière. Cette caractéristique rend le modèle automate cellulaire séduisant aux yeux d'une partie des physiciens (il s'agit là cependant d'un sujet de controverse). En effet, l'évolution récente de la physique fonde une partie de ses théories sur des principes de localité, en mettant en avant l'existence de particules messagères (d).

Et pourtant, d'un point de vue théorique, nous ne sommes pas encore prêts à passer à un modèle entièrement discret.

13.2.en biologie :

les automates cellulaires sont adaptés à la simulation d'organismes biologiques. Leur structure cellulaire peut servir à refléter l'organisation des systèmes vivants. En biologie, on est souvent confronté à des phénomènes qui agissent à plusieurs échelles et dont la réactivité dépend d'autres réactions. Les modèles simplistes d'automates cellulaires sont insuffisants pour rendre compte correctement de la diversité des astuces mises en jeu par le vivant (a).

13.3.en sociologie :

en économie ; les automates cellulaires sont encore fréquemment employés pour modéliser des phénomènes sociologiques. Là encore, il se trouve que le modèle d'automates cellulaires est trop souvent simpliste et inadapté : la seule grande idée qu'imposent les automates cellulaires, à savoir l'existence d'un état global du système qui se représente à travers l'espace et pour lequel la loi d'évolution est pareille en tout point, ne suffit pas à rendre compte de tout ce que l'on observe. Au niveau des modèles proposés, ce sont le plus souvent, soit des automates cellulaires très complexes, soit des modèles intrinsèquement plus puissants que les automates cellulaires classiques.

13.4.en informatique :

ici, ce sont la limite de leur puissance de calcul ainsi que les méthodes de programmation relatives qui captivent les chercheurs. Comment peut-on amener un automate cellulaire à calculer comme on le souhaite ? Un automate cellulaire est une architecture de calcul massivement parallèle.

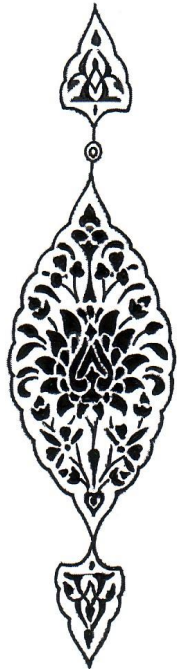


13.5. En cryptographie :

il est possible de décoder des messages en les parcourant à l'aide d'un automate qui va par exemple repérer l'occurrence de certains motifs. On peut alors raffiner le système de reconnaissance en y ajoutant des probabilités de présence de certains motifs dont peut être coutumier le producteur du code.[12]

14. Conclusion

Les automates sont un développement relativement récent de la science moderne. Extrêmement vaste et complexe à étudier, bien que facilement modélisable sur ordinateur, cette discipline est promise à un grand avenir car elle permet de modéliser de façon pratique et simple de nombreux phénomènes physiques. De plus, les « curiosités » mathématiques et philosophiques qu'elles soulèvent font d'elle un domaine passionnant pour les chercheurs. Comme cela a été développé, il s'agit d'autre part d'une nouvelle technique de modélisation qui rompt avec la tradition continue. La mécanique quantique ayant mis en avant, parallèlement à nos connaissances de l'atome un monde appréhendable de façon discrète, il est tentant de se laisser aller à rêver d'un univers, gigantesque automate cellulaire dont la nature calculerait à chaque instant l'évolution.



Chapitre III :

La modélisation par automates cellulaires



1.Introduction

Comme le rappelle Y. Guermond, (Guermond, 2005) « *l'objectif de la modélisation pour un chercheur est de reproduire au mieux le fonctionnement d'un phénomène géographique, afin d'essayer d'utiliser ensuite le modèle pour tester des hypothèses. L'objectif n'est pas de tester « un » modèle unique, ni de faire fonctionner un système qui s'invente lui-même, en produisant ses règles de manière endogène. Au contraire, le modèle devrait plutôt être envisagé comme un outil de recherche sans ambition normative, que le chercheur construit pas à pas. Les automates cellulaires conviennent bien à cette « modélisation incrémentale », qui permet par des simulations successives de constituer ce « laboratoire virtuel » évoqué par Michael Batty (Batty, 2001) indispensable pour la recherche en sciences humaines et sociales, pour lesquelles c'est la seule voie d'expérimentation ».*

Dans ce chapitre, nous allons vous montrer comment on va faire la modalisation avec automates cellulaires . Ou Nous pouvons considérer le modèle des automates cellulaires comme le pendant distinct des EDP. Ainsi, chaque fois qu'un phénomène physique est décrit par des équations aux dérivées partielles, on peut proposer des estimations sous la forme d'un humain cellulaire. Il reste à déterminer dans quelle mesure le modèle cellulaire est adapté pour expliquer et prédire le phénomène étudié. Rien n'est garanti dans le cas général et la description de la dynamique globale d'un modèle cellulaire selon sa définition locale peut être au moins aussi difficile que de résoudre un système d'équations aux dérivées partielles.

D'autre part, l'humain cellulaire peut être facilement simulé par ordinateur. Ainsi, en analyse numérique, de nombreuses méthodes consistent à estimer certaines quantités (espace, temps et valeur) pour effectuer des simulations numériques (voir Méthode des éléments finis, volumes finis ou différences finies).

2.Etat de l'art : Modalisation de la morphologie et de lamorphogénèse urbaine

Si on écarte d'emblée les approches historiques et urbanistiques de la morphologie urbaine (les plans types), et si on s'intéresse davantage à la morphologie urbaine d'un point de vue dynamique, dans sa dynamique de croissance et de développement par exemple, plusieurs modèles morphogéniques ont été développés et explorés récemment : les modèles de croissance cellulaire par percolation en sont les plus anciens représentants et ont ouvert la voie à des modèles plus récents, basés sur des approches par automates cellulaires.

Les premiers modèles de croissance de la forme urbaine se sont souvent inspirés de la physique ou de la biologie. Le modèle d'agrégation limitée par diffusion (DLA, pour



Diffusion-Limited Agregation) proposé en 1981 par les physiciens T. Witten et L.Sander, issu de travaux menés en cristallogenèse, a été utilisé dans de nombreuses applications en géographie dans les années 1990 (Batty, 1991 ; Batty, Longley, 1994 ; Le Bras, 1996 ; Schweitzer, Steinbrink, 1997 ; Bailly, 1999). Le modèle DLA permet de simuler la croissance de surfaces ou de volumes par arrivées successives et agrégation de particules décrivant une marche aléatoire. La forme résultante de ce processus peut être assimilée à un agrégat fractal. Elle est contrainte par le processus de diffusion des particules et reflète essentiellement le processus de croissance retenu (Pelcé, 2000). Or, rien n'indique que ces processus correspondent à des processus géographiques agissant sur la croissance des formes urbaines, même pour ses composantes les plus volatiles telles que les quartiers d'habitats spontanés (Barros, Sobreira, 2002).

La représentation de l'espace par des cellules fut employée dans les modèles d'utilisation du sol de F. Chapin et S. Weiss (1968) et de G. Lathrop et J. Hamburg (1965). Toutefois dans ces modèles, la dynamique d'une cellule n'était pas dépendante de ses voisines et donc les propriétés topologiques de l'espace géographique n'étaient pas prises en compte.

Waldo Tobler (1979) proposa pour la première fois l'utilisation d'automates cellulaires pour la simulation du changement de l'utilisation du sol. Dans le type de modèle proposé, celui des modèles géographiques dynamiques, l'état d'une cellule est fonction de l'état précédent du voisinage, qui inclut la cellule même. Le voisinage définit la zone d'influence géographique d'une cellule. Pour Tobler le voisinage d'une cellule le plus simple est celui qui est défini par un rectangle dont la cellule est le centre, ou celui des cellules adjacentes (Nord, Sud, Est et Ouest) de la cellule. La solution adoptée dans la description du modèle de Tobler est celle de la stationnarité des voisinages des cellules, c'est-à-dire que tous les voisinages possèdent la même forme et la même taille.

W. Tobler admet dans son article précurseur que cette définition des voisinages est arbitraire et très éloignée de la réalité: "*This model contrasts very nicely with reality in which, for example, an urban resident may have a geographical contact field that differs in size and shape from that of a rural resident, or of a suburbanite*".

Mais les difficultés topologiques rencontrées pour définir des voisinages irréguliers constituent pour lui des raisons suffisantes pour adopter dans un premier temps de telles simplifications.

L'idée d'une Géographie Cellulaire, basée sur l'influence de chaque unité spatiale de terrain sur ses voisins immédiats fut exploitée plus amplement par d'autres auteurs comme Codd (1968), Albin (1975), Nakajima (1977) et Couclelis (1985, 1988, 1989), Itami (1988), Phipps (1989), Cecchini et Viola (1990) et Takeyama (1996).



Ces développements théoriques ont servi de base à l'application des automates cellulaires au milieu urbain dans les années 1990. Les travaux de White et Engelen (1993), Batty et Xie (1994, 1997), Xie (1996), Clarke et al. (1997), Phipps et Langlois (1997) ; Papini et al. (1998) sont quelques exemples de l'application d'automates cellulaires à la modélisation du changement de l'utilisation du sol en milieu urbain.

Le modèle de R. White et G. Engelen (1993) est emblématique de ces travaux. Il s'agit d'un modèle stochastique qui utilise un potentiel de transition du type :

$$P = (1 + \sum \omega)^* \varepsilon$$

Ce potentiel P décrit l'influence exercée sur une cellule par les cellules voisines caractérisées par une certaine catégorie d'utilisation du sol. Le poids ω exercé par une cellule est décroissant avec la distance. Le facteur ε introduit la stochasticité dans le modèle. L'évolution du nombre de cellules devant posséder un certain type d'utilisation du sol est déterminé de manière externe à l'automate, puis les cellules ayant le plus grand potentiel de transition changent d'état pour satisfaire la demande. L'application de ce modèle à la ville de Cincinnati a montré qu'il permet une bonne prédiction de l'évolution urbaine : les variations introduites par le paramètre stochastique n'augmentent pas inconsiderablement la variabilité des trajectoires temporelles du modèle. Les zones pour lesquelles des différences entre le comportement du modèle et la réalité de l'évolution de la ville sont significatives peuvent être identifiées et des singularités locales mises en évidence. Cet exemple illustre la manière dont les modèles géographiques fondés sur des automates cellulaires permettent d'analyser le système urbain dans sa dynamique spatio-temporelle.

R. White et al. (1997) ont introduit l'effet du réseau de transport et des éléments d'infrastructure comme des contraintes dans leur modèle, dans ce qu'ils ont appelé un "automate cellulaire contraint" ("constrained cellular automata"). Cette notion a été employée par la suite dans les modèles subséquents afin d'intégrer le rôle de l'accessibilité dans les fonctions de transition et tenir compte du facteur de site et des stratégies d'aménagement dans la dynamique des modèles. De nombreux modèles ont été développés dans lesquels le rôle des structures de voisinage est complété par l'inclusion de facteurs de nature spatiale dans les fonctions de transition (Xie, 1996 ; Batty, Xie, 1997 ; Phipps, Langlois, 1997 ; Engelen et al., 2002 ; Barredo et al., 2003 ; Dubos-Paillard et al., 2003).

Bien que ces modèles aient intégré l'impact des infrastructures de transport sur l'évolution urbaine, l'effet des réseaux et des modes de transport est difficile à définir dans



des structures cellulaires. Même si l'intégration de contraintes spatiales a permis d'introduire une certaine hétérogénéité spatiale dans les modèles, l'approche reste fondamentalement contrainte par des hypothèses spatiales d'isotropie et de stationnarité. Or, ces hypothèses ne permettent pas de rendre compte des relations spatiales complexes en milieu urbain.

Certains géographes ont affirmé que ces hypothèses, qui ne sont pas pertinentes pour décrire des structures complexes de l'espace géographique, devraient être abandonnées, au moins en partie. D. O'Sullivan (2001a) a ainsi montré qu'il est nécessaire de redéfinir le formalisme des automates cellulaires à cause de la grande sensibilité des processus spatiaux à des faibles modifications de la structure de l'espace dans lequel ils ont lieu.

H. Couclelis (1997) a également ouvert la discussion sur la relation entre l'espace proximal, les automates cellulaires et le formalisme de ce type de modèles à travers une Géométrie algèbre (Couclelis, 1997 ; Takeyama, 1996 ; Takeyama, Couclelis, 1997). Son analyse constitue un effort pour résoudre le problème de la relation entre structure et processus dans les modèles géographiques à base d'automates cellulaires. À l'issue de sa réflexion une formalisation d'une théorie géo-computationnelle a été avancée.

Les relations spatiales dans les automates cellulaires peuvent être définies de manière explicite à travers une approche basée sur des graphes mathématiques. Le formalisme des graphes peut être employé pour décrire la complexité des relations de proximité et peut être intégré dans les automates cellulaires pour la simulation urbaine (O'Sullivan, 2000, 2001a, 2001b). Le cadre théorique des graphes offre un grand éventail de méthodes et d'outils qui rend aisée l'exploration des relations entre forme et fonctionnement dans la ville.

D'un point de vue formel (Takeyama, Couclelis, 1997) un automate cellulaire géographique peut être défini comme un quadruplet (U, V, E, F) , avec :

- $U = \{U_1, U_2, \dots, U_i, \dots, U_n\}$, ensemble fini de n unités spatiales ou cellules. Ces unités sont le plus souvent agencées dans une grille régulière.
- $V = \{V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_n\}$, ensemble de voisinages définis par un critère topologique (contiguïté) ou géométrique (distance entre unités spatiales). Chaque voisinage V_i correspond à la liste des m unités spatiales qui sont voisines de la cellule i selon le critère choisi : $V_i = \{U_j, U_x, \dots, U_m\}$.
- E , ensemble des états possibles des cellules, définies par des variables qualitatives ou quantitatives, généralement discrètes.
- F , fonction de transition, probabiliste ou déterministe, qui détermine le changement d'état de chaque cellule à chaque pas de temps, selon l'état de la cellule et les états des cellules environnantes :

$$E_i^{t+1} = f(E_i^t; E_{N_i}^t)$$



On peut donc distinguer dans cette architecture une composante structurelle $\{U,V\}$ et une composante dynamique $\{E,F\}$ dans la formalisation mathématique d'un automate cellulaire (AC) :

$$AC = (\{ U , V \} , \{ E , F \})$$

La première composante permet de définir la manière de formaliser les structures spatiales qui conditionnent la dynamique de l'automate. Les automates géographiques ont toutefois le plus souvent été développés en référence à un cadre formel extérieur, selon lequel « les automates cellulaires sont des automates répartis sur les nœuds d'un réseau périodique, c'est-à-dire une structure géométrique discrète, conservée par certaines opérations de translation et de rotation » (Weisbuch, 1989, p. 1). La plupart des références (Nakajima, 1977 ; Xie, 1996 ; Batty, Xie, 1997 ; White, Engelen, 1997 ; Langlois, Phipps, 1997 ; Phipps, Langlois, 1997 ; Engelen et al., 2002 ; Barredo et al, 2003 ; Langlois, 2010) s'inscrivent dans une telle perspective.

Afin de prendre en compte d'autres relations spatiales entre unités, D. O'Sullivan proposa l'utilisation d'automates cellulaires à base de graphes (2000, 2001a, 2001b). Ces modèles vont au-delà de la stationnarité en redéfinissant la composante structurelle de l'automate qui manque de réalisme dans un environnement urbain. Un tel automate permet d'analyser l'impact de la morphologie sur le comportement et l'évolution des systèmes urbains, à l'image du modèle Raumulus, conçu dans l'objectif d'analyser l'influence de différents types de proximités sur la croissance d'une surface bâtie autour d'une ou plusieurs centralités urbaines.[15]

3.La modalisation

Selon Schmidt et Pavé [2002], la modélisation est la méthode qui permet de représenter un objet ou un phénomène du monde réel par une formule d'un système formel choisi. La simulation quant à elle, ou plus souvent encore la simulation numérique, est la méthode qui permet de mettre en œuvre un modèle et notamment d'obtenir des valeurs calculées pouvant être confrontées à des valeurs observées.

Le but de la modélisation et de la simulation est essentiellement de comprendre les phénomènes observés, de tester les hypothèses et les théories ainsi que de prédire le comportement spatiotemporel des systèmes dans divers scénarios et conditions, et de découvrir le fonctionnement des phénomènes géospatiaux grâce, entre autres, aux expériences faites sur ordinateur. les différentes étapes des processus de modélisation et de simulation



montrant le passage du monde réel vers l'utilisation des résultats en passant par la modélisation conceptuelle et formelle, l'étude logique et analytique et la validation.

Il est toujours difficile de classifier les méthodes de modélisation car celles-ci dépendent en grande partie non seulement des processus qu'on étudie mais aussi des objets pris en compte. On assiste alors assez souvent au développement de méthodes qui ne se fondent que sur l'utilisation d'un outil mathématique qui sert de base de modèle : modèles dynamiques construits sur des équations différentielles; modèles logistiques pour expliquer des processus comportementaux désagrégés, systèmes multi-agent pour analyser des phénomènes de diffusion et de colonisation d'espaces, etc. Ces différents outils donnent naissance, en fonction de leur utilisation, à différentes grandes familles de modèles [Durand Dastès, 1992] : agrégés ou désagrégés, dynamiques ou statiques, explicatifs ou descriptifs, déterministes ou probabilistes.

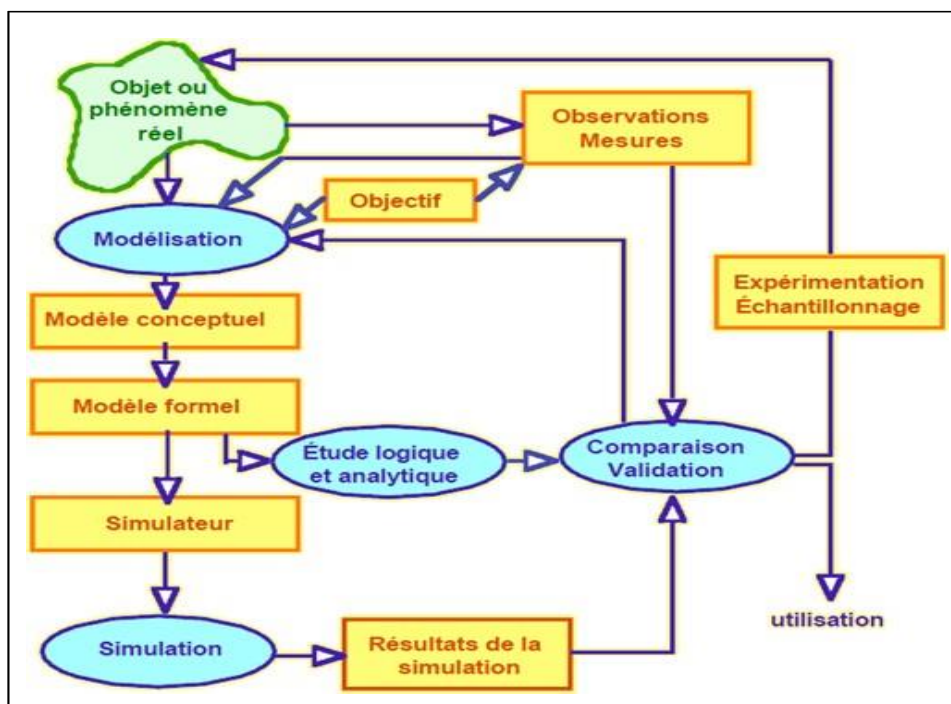


Figure III.1 : Schéma méthodologique général de modélisation et de simulation [Schmidt et Pavé, 2002]

Si on désire classifier les méthodes et approches de modélisation en se basant sur la littérature, on peut annoncer que deux grandes catégories de modèles peuvent être citées. D'abord, les modèles empiriques qui sont fondés sur l'analyse statistique des données observées et ne sont généralement applicables que dans les conditions où les observations ont été faites. Puis, les modèles basés sur des processus, qui sont fondés sur la compréhension des processus physiques, chimiques, géologiques, biologiques ou socio-économiques, ainsi que



leur description mathématique. Les modèles des systèmes complexes ont souvent recours à la combinaison d'approches empiriques et d'approches basées sur les processus [Mitasova,1998]. Ceci dit, les processus réels sont complexes et incluent souvent des comportements non-linéaires, des composants stochastiques et des boucles de rétroaction sur des échelles spatiales et temporelles différentes. Ainsi, les modèles peuvent représenter les processus uniquement avec un certain niveau de simplification.[1]

4.Modalisation par automate cellulaire

Comme la majorité des automates cellulaires, ce modèle repose sur un mécanisme stochastique de transition des cellules qui changent d'état en fonction d'un potentiel de transition qui leur est propre. A l'initialisation du modèle, chaque cellule du modèle possède un état qui correspond à un mode d'occupation du sol parmi les sept classes définies plus haut. Par ailleurs, le modélisateur caractérise chaque état en fonction du mécanisme de transition des cellules qu'il précise de la façon qui suit :

- L'état « immuable » gèle les cellules dans leur état initial pour toute la durée de la simulation.
- L'état « vacant » permet aux cellules de changer d'état sans restriction.
- L'état « fonctionnel » permet aux cellules de changer d'état dans une certaine proportion définie en début de simulation.

Dans notre modèle, seules les cellules urbaines et agricoles sont déclarées fonctionnelles et donnent lieu à la définition d'objectifs à atteindre en fin de simulation en terme de surface globale. Pour ces cellules, la transition d'état est fonction d'un potentiel de transition (T) qui dépend des six facteurs suivants :

- L'effet de voisinage (P)
- L'occupation du sol actuelle (comprise dans P)
- Le zonage géographique (Z)
- L'aptitude physique (S)
- L'accessibilité (A)
- Une perturbation aléatoire (random)

Pour ces cellules urbaines et agricoles, le potentiel de transition « T » vaut :

$$T = (1+(-\log(\text{random})^{0.35})*(P+10*S+100*Z+50*A))$$

Les cellules de forêt, de végétation mixte et de sol à nu ont été quant elles déclarées « vacantes », ce qui signifie qu'elles peuvent s'étendre ou au contraire se raréfier sans aucune restriction. Pour ces dernières, le potentiel de transition « T » ne dépend que de l'addition de



l'effet de voisinage et de l'aptitude physique ($T=P+S$). Enfin, les cellules qui constituent la frange littorale et les pentes supérieures à 30% sont déclarées « immuables » : non concernées par la transition d'état, elles ont donc un potentiel de transition nul. Comme on le voit, le calcul des potentiels de transition des cellules qui va décider de la dynamique repose dans une large mesure sur les informations contenues dans les six facteurs énumérés plus haut, parmi lesquels l'effet de voisinage P joue un rôle prépondérant. Celui-ci donne lieu à un paramétrage particulièrement fin à partir d'un tableau croisé des influences entre les différents états des cellules . Pour décrire ces influences entre type d'occupation du sol, le modélisateur définit sous la forme d'une courbe les effets d'attraction ou de répulsion qui s'exercent dans le voisinage des cellules dans un état donné. En amont de la simulation, cette étape préalable au calcul du potentiel est à bien des égards la plus délicate puisque le modélisateur doit tester un nombre important de courbes avant de tracer celle qui rend compte de façon satisfaisante des effets d'attraction ou de répulsion entre tous les modes d'occupation du sol. Il va sans dire que toute modification de forme d'une courbe a souvent une incidence directe sur la dynamique globale du système. [17]

5.Utilisation des automates cellulaires en modélisation

De nombreux modèles sont basés sur les AC. voici une liste, non exhaustive, de phénomènes ayant été modélisés par des AC :

- Feux de forêts (5)
- Traffic automobile dans un réseau de rues (10)
- Étalement urbain (55)
- Dissolution de cristaux (32), fonte de glace (52)
- Croissance des arbres, des feuilles, des fleurs, des plantes, des mollusques (61), des coraux (33), des cristaux (flocons de neige) (1)
- Turbulence dans les fluides, dynamique des fluides, dynamique des gaz (i.e., modèles lattice-gaz) (18)
- La diffusion (thermique, électrique, chimique, etc) (25) [18]

6.Créations des automates cellulaires

D'une manière générale, on peut construire tout type d'automate cellulaire en jouant sur les règles structurelles et fonctionnelles. Les premières définissent la structure spatiale du réseau d'automates, soit sa géométrie. Ces règles structurelles sont le nombre de dimensions, le mode d'arrangement des cellules (i.e., carré, triangulaire ou hexagonal pour une matrice en



deux dimensions) et la détermination du voisinage. Les secondes déterminent le nombre d'états et les règles de transition. Le choix de ces deux types de règles permet de construire un univers (modèle) adapté à l'objectif recherché.

6.1.Matrice

Certains auteurs emploient les termes grille, treillis, réseau, voire même échiquier, pour désigner l'espace contenant les cellules sur un automate cellulaire. Tous ces termes sous-entendent que l'AC est bidimensionnel. Or, comme nous travaillerons sur des espaces à deux et trois dimensions, nous utiliserons plutôt le terme matrice pour désigner l'espace d'un AC.

La matrice, que celle-ci soit bidimensionnelle ou tridimensionnelle, n'est pas limitée à des cellules carrées ou cubiques. En fait, certains phénomènes sont plus facilement modélisables lorsque la géométrie des cellules est différente. Les géométries triangulaires et hexagonales sont celles les plus couramment utilisées.

6.2.Voisinage

Soit une matrice M bidimensionnelle, le voisinage est l'ensemble des cellules entourant la cellule $M(i,j)$ qui peuvent avoir un impact sur celle-ci. La cellule $M(i,j)$ ne fait normalement.

Pas partie du voisinage. Les voisinages les plus connus sont ceux de von Neumann, Moore et Margolus. On peut également utiliser d'autres types de voisinages mais leur application à des modèles du monde réel semble restreinte.

6.3.Conditions de bordure

Même si en théorie un automate cellulaire ne devrait pas avoir de borne, la mise en oeuvre sur un ordinateur requiert de définir des matrices de taille finie. On définira alors des conditions aux bordures qui permettront de simuler une matrice de taille infinie (par exemple, en changeant les valeurs des bordures de manière périodique). Toutefois, il arrive souvent que le phénomène naturel qu'on désire simuler soit défini pour un environnement bien précis et nécessite des contraintes pour être réaliste. Dans pareil cas, on utilise une condition de bordure à valeur fixe qui consiste à définir des bornes et à les garder tout au long de l'exécution de l'AC. C'est ce type de condition de bordure qui sera utilisé dans le simulateur.

6.4.Conditions initiales

Les conditions initiales peuvent être générées aléatoirement ou être spécifiées de façon particulière. Une façon courante de générer aléatoirement une condition initiale est de définir un nombre de cellules proportionnel à un pourcentage prédéfini auquel correspond un état



possible. Par exemple, si les états possibles sont un nombre fini de couleurs (bleu, rouge et jaune), alors on fera correspondre à chaque état un pourcentage pertinent pour le problème:

- Bleu: 10%
- Rouge: 20%
- Jaune: 70%

Par conséquent, si le nombre total de cellules de la matrice est 100, on distribuera de façon aléatoire ou particulière (selon le problème), 10 cellules à l'état bleu, 20 cellules à l'état rouge et 70 cellules à l'état jaune.

6.5.Règles de transition

Les règles de transition définissent la nature des interactions entre les cellules. Les règles de transition sont par définition homogènes et appliquées de façon simultanée sur l'ensemble des cellules de la matrice. Les règles ne sont ni plus ni moins qu'un algorithme qui permet de déterminer vers quel état évoluera une cellule à la prochaine itération en fonction de l'état des cellules de son voisinage.

Peu de choses sont connues sur la conception des règles de transition. Ainsi, il n'existe aucun algorithme permettant de déduire systématiquement les règles à utiliser pour produire un certain comportement observable ou mesurable des AC. L'ensemble des règles de transition que peuvent prendre un automate est infini. Une règle traditionnelle consiste à compter le nombre de cellules du voisinage qui sont à l'état $E_0, E_1, E_2, \dots, E_n$, et à décider de manière prédéterminée (20) ou de manière probabiliste (32) l'état suivant.[18]

7.Différentes variantes d'automates cellulaires

Il existe de nombreuses variantes d'automates cellulaires correspondant à autant d'utilisations différentes[Golay, 2007]. D'une manière générale, on peut noter les variantes suivantes :

- **Fonctionnement de l'automate cellulaire** : Il est dit synchrone lorsque toutes ses cellules changent d'état en même temps. Le nouvel état d'une cellule est donc calculé à partir de l'état précédent de tout le voisinage. Dans le cas où les cellules déclenchent leur mécanisme de transition les unes après les autres, l'automate est dit asynchrone.
- **Dimension de l'automate** : Il existe des automates dont la grille associée possède une, deux ou trois dimensions (**Figure III.4**). Dans le cas des automates cellulaires modélisant un phénomène hydrodynamique, la plupart des grilles sont de deux dimensions.



Dans certains cas on introduit l'élévation du terrain pour chaque cellule ce qui induit une dimension 2 et 1/2 comme dans le travail de Parsons et Fonstad [2006].

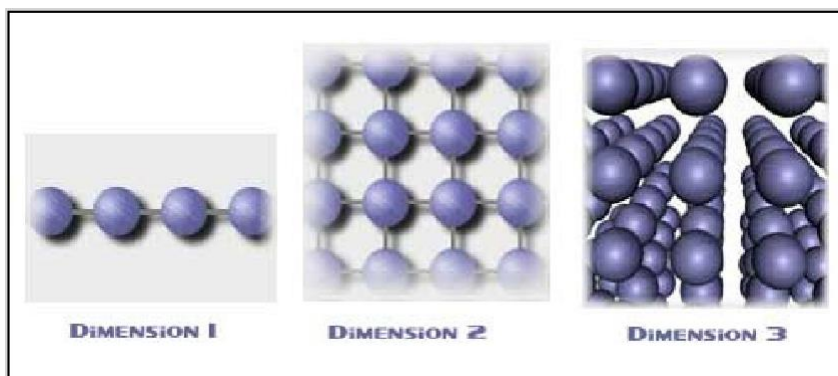


Figure III.2 : Différentes dimensions d'un automate cellulaire

- Structure du maillage : Dans le cas bidimensionnel, il s'agit en général de carrés, mais on peut également trouver d'autres formes comme par exemple des triangles ou des hexagones (**Figure III.5**). En trois dimensions, les cubes (**Figure III.6**) sont les plus utilisés [Pichler, 2003].

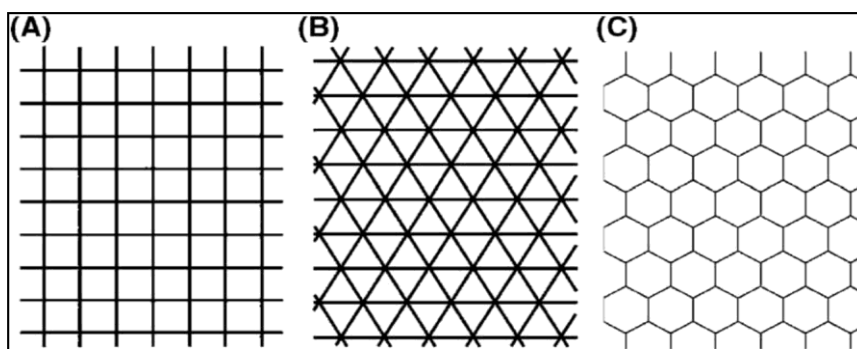


Figure III.3 : Tessellations du cas bidimensionnel : (A) grille carrée; (B) grille triangulaire et (C) grille hexagonale

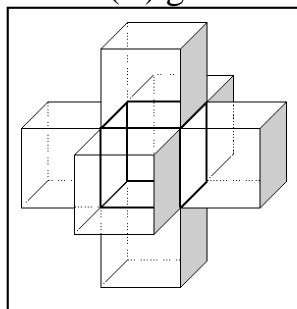


Figure III.4 : Tessellation tridimensionnelle cubique



- Type de voisinage : C'est l'ensemble des régions qui ont une influence sur une cellule qui constitue le voisinage d'une cellule. Le voisinage de l'automate cellulaire traditionnel est composé de quatre cellules adjacentes aux côtés de la cellule centrale : c'est le voisinage de Von Neumann [Parsons et Fonstad, 2006] ou de huit cellules adjacentes à la cellule centrale (voisinage de Moore). Deux versions étendues de ces voisinages sont aussi possibles telles que nous les illustrons dans la **Figure III.7**.

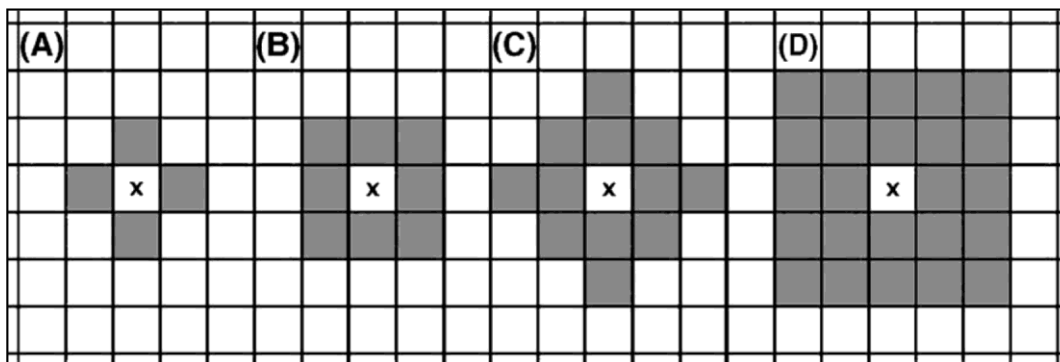


Figure III.5 : (A) Voisinages de Von Neumann; (B) de Moore; (C) de Von Neumann étendu et (D) de Moore étendu

Pour une tessellation hexagonale, le voisinage d'une cellule est généralement formé des six cellules adjacentes .

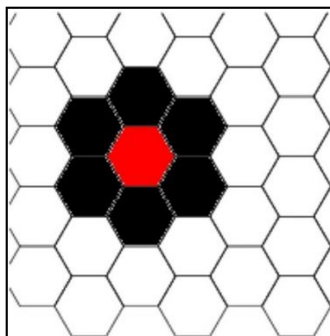


Figure III.6 : Voisinage pour une tessellation hexagonale

Dans le cas tridimensionnel cubique, il existe trois définitions possibles du voisinage d'une cellule : soit on considère les six cellules qui partagent une face avec la cellule centrale; ou bien on leur ajoute les douze autres cellules qui partagent un côté avec la cellule centrale (un total de 18 cellules) ou encore on considère les 18 derniers en ajoutant les huit autres qui partagent un sommet avec la cellule centrale (un total de 26 cellules).

- **Mécanisme de transition** : Il est déterministe si l'état d'une cellule dépend



directement de l'état du voisinage au pas de temps précédent. Si c'est une fonction de probabilité qui détermine la transition, l'automate est dit stochastique. D'après Dawson et al. [2009], les règles de transition de l'automate cellulaire forment le moteur de la simulation car elles déterminent le comportement du modèle et l'évolution de la simulation.

Au niveau pratique, les automates cellulaires s'appliquent dans des domaines aussi variés que la reconnaissance de formes, la cryptographie, les systèmes urbains, ainsi que la modélisation des processus physiques, moléculaires et géographiques.

Dans la littérature, les automates cellulaires ont subi différents types d'ajustements de leurs composantes principales. les types d'automates cellulaires en fonction des composantes typologiques. Ceci nous permettra par la suite de bien situer les particularités de l'automate cellulaire que nous avons utilisé.[1]

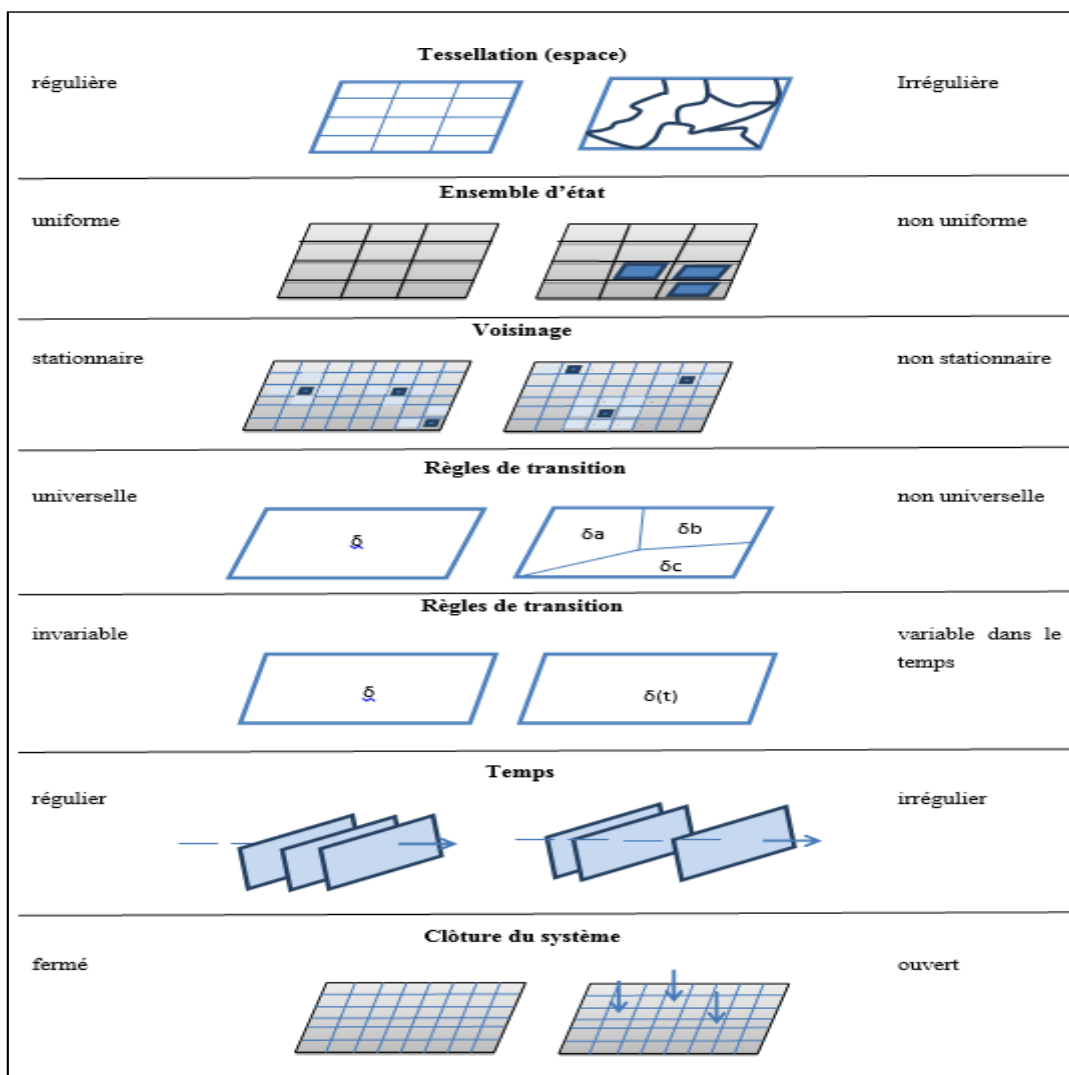


Figure III.7 : Composantes typologiques des automates cellulaires



Structure de l'automate

L'ensemble S des états (on note n , le nombre d'états) est défini par l'utilisateur. Un *état* est une valeur descriptive de l'espace de la cellule, par exemple un type d'occupation du sol. Une cellule possède, à chaque instant, au plus un état, sinon elle est vide, elle est alors éliminée dès le départ du domaine d'étude. Les cellules (non vides) sont regroupées en classes. Une classe $C(s)$ est l'ensemble des cellules ayant un même état s . Une cellule munie de son état s sera aussi appelée individu appartenant à la classe $C(s)$. À chaque classe $C(s)$ est donc associé son état de vie s , mais aussi une espérance de vie, et un état de mort.

La vie, la mort, la force vitale. Chaque individu i du domaine, naît, vit et meurt. Il est caractérisé par sa localisation p_i et son état s_i qui sont constants durant toute sa vie. Il possède aussi un âge, $g_i = t - n_i$ où n_i est l'instant de sa naissance et t le temps. Enfin, il est doté d'une force vitale $w(g_i)$ qui est fonction de son âge g_i . Elle est maximale à sa naissance et décroît avec l'âge jusqu'à sa mort naturelle. La force vitale de l'individu lui permet de conserver son état en « résistant » aux forces environnementales. Lorsque la force vitale, $w(g_i)$ d'une cellule est épuisée, ($w(g_i) \leq 0$), celle-ci prend l'état de mort défini pour sa classe. Néanmoins, chaque individu peut mourir prématurément lorsque sa force vitale devient plus faible que les forces environnementales qui agissent sur lui. Un nouvel individu se développe alors à sa place. Il peut aussi mourir de sa belle mort, lorsque sa force de vie s'annule, ayant atteint son âge maximal.

La durée de vie d'une classe peut être infinie, fixe ou aléatoire. Par exemple, si la classe d'état « fleuve » est de durée de vie infinie, l'âge maximal de tout individu d'état « fleuve » est infini ($G_i = \infty$). Dans le cadre d'une rotation culturale, la classe « blé » est de durée de vie fixe de 1 an ($G_i = 1$), à sa mort l'individu prendra par exemple l'état « orge » qui suit. Si enfin la classe « habitat peu dense » a une durée de vie aléatoire d'espérance 150 ans et d'écart-type 50 ans, chaque individu de cette classe sera muni à sa naissance d'un âge maximal G_i tiré aléatoirement selon la loi de Laplace-Gauss de moyenne 150 et d'écart-type 50, son état de mort sera par exemple de la friche. L'état de mort peut être différent ou identique à l'état de vie. Ainsi, « l'habitat peu dense » peut garder son statut, si on considère qu'il fait l'objet d'une rénovation ou d'une reconstruction qui lui redonne une force de vie maximale sous une forme d'habitat modernisé.

Pour chaque classe, son état de vie, sa durée de vie et sa mort sont définis à travers une donnée particulière, exprimée par l'utilisateur, appelée règle de vie et composée de trois termes selon la forme syntaxique suivante :



$$s > s' = F$$

où F peut prendre l'une des trois formes syntaxiques suivantes : DI, pour une durée de vie infinie ; DF(n), pour durée de vie fixe de n unités de temps ; DA(m, s), pour une durée aléatoire selon une loi de Laplace-Gauss, d'espérance de vie m et d'écart-type s.

La règle de vie de chaque classe de cellules est traduite, en interne, par une règle de transition stationnaire ou de conservation de la forme :

$$s > s = w(g)$$

et qui représente la force potentielle de maintien en vie (force vitale), dans l'état s, d'une cellule donnée, w étant la fonction calculant cette force selon de l'âge de la cellule. Elle est calculée par la fonction d'évaluation :

$$w(g_i) = 1 - \frac{g_i}{G_i}$$

où g_i est l'âge de la cellule i. G_i est sa durée de vie maximale. Il vaut donc la naissance et décroît de manière continue sauf si G_i est infini, auquel cas w_i reste égale à 1.

Les règles de transition et la base de connaissances. Les règles de transition et les règles de vie constituent la base de connaissances qui fera fonctionner le modèle. Une règle de transition se présente comme une ligne de texte écrite dans un langage particulier reconnu par l'automate. Nous n'avons pas la place ici de décrire formellement la grammaire du langage SpaCelle, mais sa forme générale est la suivante :

$$s > s' = F(a)$$

Elle exprime quelle serait la force potentielle F(a) résultant de l'environnement a d'une cellule donnée, qui la pousserait à transiter de l'état s vers s'.

Chaque règle r_k , aussi bien de transition que de vie, est représentée en interne, sous forme de triplet $r_k = (s_k, s'_k, F_k)$ où s_k est l'état initial, s'_k , l'état final de la transition, et F_k la fonction d'évaluation. L'ensemble des règles de la base sera noté B. Les règles sont regroupées selon l'état initial s. Notons R(s) l'ensemble des règles de B dont l'état initial est s :

$$R(s) = \{r_k \in B \mid r_k = (s_k, s'_k, F_k) \text{ et } s_k = s\}$$

[2]



8.Conclusion:

La modélisation de la croissance urbaine par les dispositifs cellulaires a connu un renouveau ces dernières années. L'importance de la disponibilité des données d'occupation du sol et la capacité à calibrer les modèles avec ces données expliquent en partie cet essor. Des développements méthodologiques visant à complexifier les fonctions de transition dans les automates (fonctions probabilistes, logique floue) ont également permis d'améliorer le calibrage de ces modèles afin de rendre les résultats de simulation plus réalistes. La ville peut être un outil d'aide à la décision important car elle permet de mieux comprendre les processus morphologiques à l'œuvre, leurs principaux déterminants et leurs conséquences. Elle peut également être intégrée à l'aménagement du territoire dans la mesure où elle permet de tester différents scénarios d'aménagement urbain.



Chapitre IV :
Simulation de
la ville M'sila par l'AC



1. Introduction

Dans ce chapitre on va discuter sur étude urbaine de la ville M'sila et en va analyse de l'évolution de l'espace de la ville M'sila afin de trouver une solution pour simuler et met le conduit a tenir pour elle ,dans le but de prévoir le devenir de la ville , Où en est l'urbanisation dans la ville M'sila La période entre (1986 - 1975) a été témoin d'une grande expansion et d'un changement de la structure et du tissu urbain de la ville de M'sila, de sorte que l'organisation et la planification sont celles qui régissent les expansions pour lesquelles la ville est connue. des programmes de services, ainsi que des programmes de logements et d'équipements généraux approuvés par le deuxième plan quinquennal, et à partir de 1975, les responsables se sont chargés du problème de la reconstruction, et la ville a bénéficié de la première étude de terrain et du plan d'urbanisme, qui est le plan directeur d'urbanisme (P.U.D) en 1977, qui parmi ses résultats a été la création de la nouvelle zone résidentielle urbaine à côté de la zone industrielle en 1975 .

Après 1986, Durant cette période, le plan d'urbanisme réalisé en 1990 est remplacé par une nouvelle méthode similaire connue sous le nom de schéma directeur d'aménagement et de reconstruction (P.D.A.U), ainsi que l'émergence du parcellaire d'occupation du sol (P.O S).

La caractéristique la plus importante de cette étape est la poursuite de l'expansion urbaine de la zone urbaine du côté ouest, car elle a vu la naissance de nombreux quartiers collectifs, tels que le quartier de 1000 logements, et le quartier de 500 logements, ainsi que comme certaines divisions en terre représentées dans les environs de 700 logements, 924 logements, 346 logements et 608 logementsetc.

En plus de la localisation de nombreux projets et équipements à sphère d'influence qui s'étendent en dehors de l'agglomération, comme l'Université Mohamed Boudiaf et la voie ferrée.

Pour atteindre notre objectif dans la simulation de la ville m'sila, nous posons les questions suivantes Quel était le plan à la lumière duquel la ville de M'sila a été établie, et était-il spontané ? Ou prévu ? Quel est le type et son genre de ce plan? Cela nous oblige à rechercher financièrement le plan et le schéma sur lesquels il était basé pour en arriver à un contrôle et à une description précise de celui-ci qui nous aide à le classer, à comprendre les repères de son développement historique et à prédire la direction de son développement et de son expansion à l'avenir.

2. Problématique

On se propose de simuler l'évolution urbaine de une ville par l'Automate cellulaire ,en prenant la ville de M'sila comme cas d'étude dans l objectif de prévoir le devenir de la ville



pour une stratégie rationnelle assurant toutes les nécessités de la population tout en préservant les conditions du vie .

On peuvent utilisé plusieurs système informatique pour simulé cette évolution urbaine par Automate cellulaire comme le modèle SpaCelle ou JAVA qui facilité les méthode de simulation.

Pour cela on collecte les images de l'extention des années ancien de la ville jusqu'à maintenant, On va extrait les données de l'évolution en dévissant les région étudiée en cellules et on procède à la régression des données une fonction de transition de l'automate cellulaire à concevoir .

3.contexte

donc il existe une multitude de modèles possibles pour décrire la ville et son fonctionnement, dépendant chacun d'une manière de voir les choses, conditionnée par l'approche disciplinaire de leurs concepteurs. A partir de théories fondatrices souvent anciennes et très simples, l'intégration des points de vue est désormais rendue possible par les développements techniques et conceptuels les plus récents.

Nous allons étudier à travers d'exemple concret qui est la ville de M'sila : de voir de quelle façon la gestion de l'espace urbain est mise en œuvre et dans quelle mesure les principes de gouvernance sont appliqués de par le plan directeur d'aménagement et d'urbanisme qui doit incarner l'esprit de la bonne gouvernance, tout en mettant les thèmes environnementaux au centre des préoccupations urbaines afin de clarifier l'apport réel de la réglementation en matière d'urbanisme et d'environnement ,D'évaluer l'efficacité et les limites des mesures prises pour gérer l'espace urbain en vue d'une meilleure qualité environnementale à l'échelle de la ville de M'sila ,D'explicitier les différents aspects qui influent considérablement sur les actions visant la gestion de l'espace urbain, tout en soulignant que les acteurs urbains se trouvent engagés dans un jeu complexe qui suppose comme objectif le développement urbain, mais qui pourtant se heurte à des résistances qui apparaissent tant au niveau spatial qu'au niveau social.

Dans ce cas d'étude de wilaya de m'sila Nous avons pris l'espace urbain et ses environs à différent année ces périodes retenues correspondent à des phases différentes de la croissance urbaine pendant la période coloniale jusqu'a maintenant Analyse de l'évolution de l'espace m'sila Constitution des cellules et règles de vie Chaque cellule s'est vu attribuer un état et une durée de vie qui est soit gaussienne soit infinie Les réseaux routiers et ferroviaires, le centre historique, le fleuve, la forêt et les espaces verts situés dans l'urbain ainsi que les équipements publics ont une durée de vie infinie.



4.Présentation de la ville du M'sila

La ville de M'sila constitue la capitale de la région du Hodna. Le territoire du Hodna s'étale sur une superficie de 6951 Km², une superficie de 18 175 km², située à quelques 240 kilomètres au Sud-Est d'Alger et à 60 kilomètres de Bourdj Bouariridj, M'sila fut le lieu de brassages de plusieurs civilisations. Faisant partie du royaume de Massinissa, c'était une terre Berbère, mentionnée par Ibn Khaldoun. La ville a été fondée par les Fatimides, M'sila a été créée par Aboul Kassem, de la dynastie Fatimide, en 927. Riche de par son histoire, beaucoup de vestiges marquent l'existence des berbères, que ce soit à Mâatar, Sidi Ameer, Bousâada ou Tafza.

Le mot M'sila signifie, en amazigh, «façonner» ou «aplatir quelque chose», il veut aussi dire «plat» ou «terre plate» (les plaines). Son histoire est directement liée à celle des Hammadites (Beni Hammad), descendants des Grandes tribus berbères de Koutama. Selon d'autres sources, il viendrait du nom féminin berbère, «Tumsilt» ou «tamsilt» «celle qui est bien façonnée», du verbe msel, bien façonner, est limitée par : la commune de Metarfa à l'Est ; la commune d'Ouled Madhi au Sud ; la commune d'Ouled Mansour à l'Ouest ; la commune d'El euch (wilaya de Bordj Bou Arriridj) au Nord.[20]

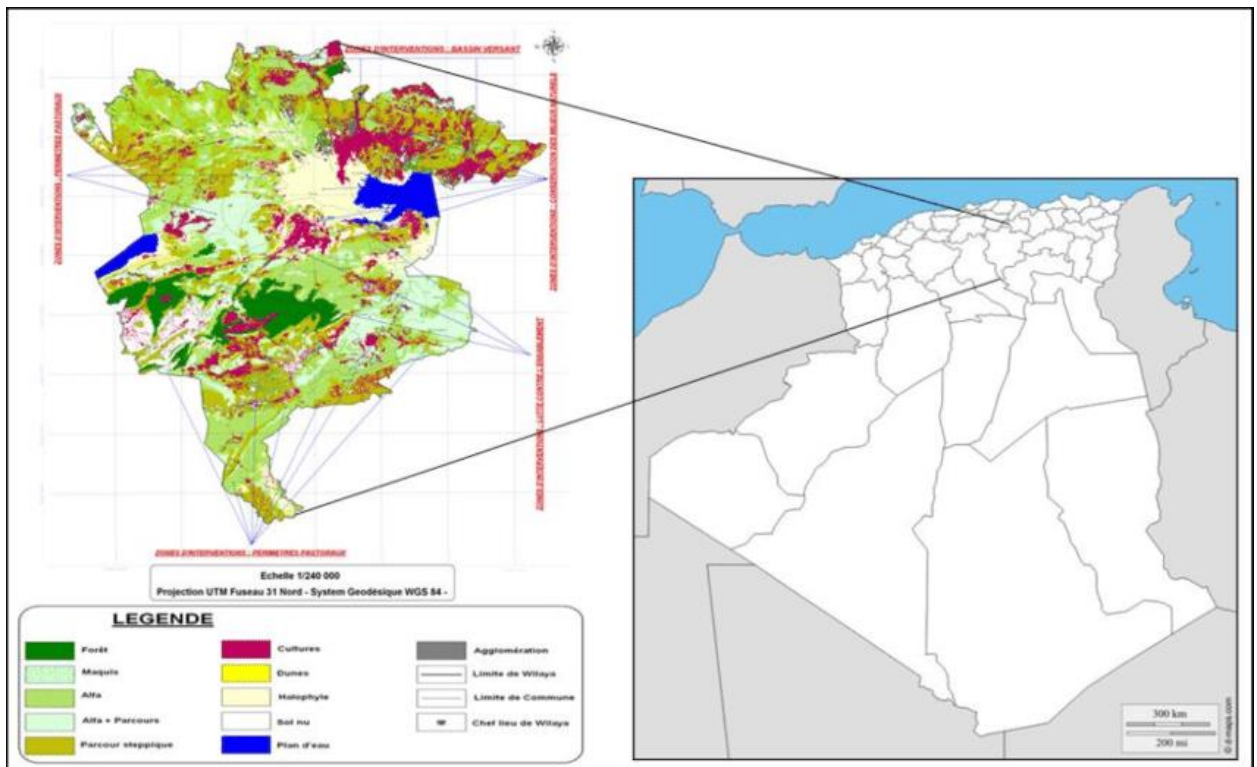


Figure IV.1: Localisation de la région d'étude Carte d'occupation des sols de la



5. Analyse de l'évolution de l'espace de la ville M'sila
situations observées dans la période coloniale



Figure IV.2: Les quartiers et places publiques de la ville de M'sila pendant la période coloniale (1950)

La première installation civie cloniale date de 1895, Elle prenait appui sur les abords de la cité ancienne, associée aux vergers qui terminaient le quartier d' El Argoub, le long de la route de Boussaâda, D'un point de vue urbanistique, l'administration coloniale avait choisi la rive ouest de l'Oued Ksob comme lieu de son implantation.[21][22]

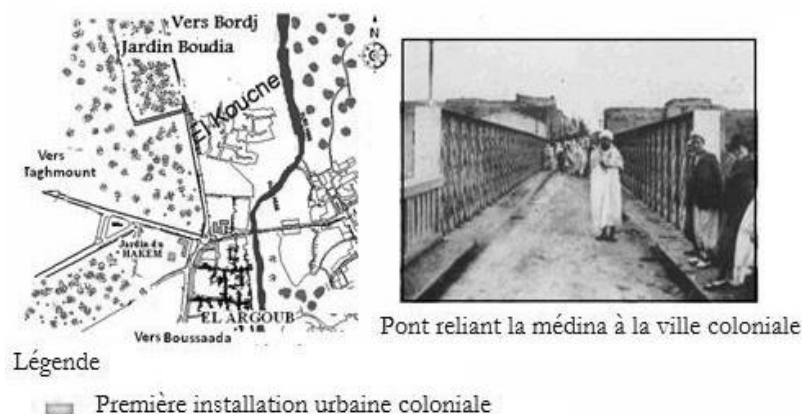


Figure IV.3: La première installation urbaine coloniale aux abords du quartier d'El Argoub aux alentours de 1895



situations observées dans les années 2000

La croissance urbaine de la ville M'sila, ont agi sous l'influence de facteurs économiques et sociaux sur l'environnement. L'organisation de l'extension spatiale basée théoriquement sur des outils de planification (PUD, PUP, PDAU et POS), Vu l'existence de plusieurs contraintes, la croissance urbaine de la ville de M'sila s'est orientée vers le Nord-Ouest. Ces contraintes peuvent être résumées comme suit :

- contraintes naturelles : Oued K'sob ;
- contraintes artificielles : la zone industrielle, la centrale électrique, les lignes d'oléoduc et de gazoduc, ainsi que de chemin de fer ;
- contraintes juridiques

C'est ainsi que le développement de la ville de M'Sila s'est effectué selon

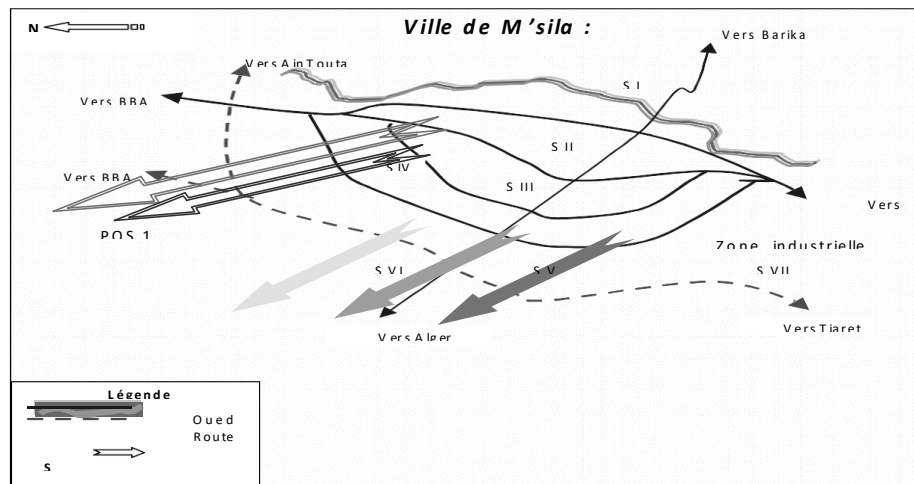


Figure IV.4 : Évolution spatiale de la ville de M'sila

Nous avons vu que Le plan de la ville de M'sila montre que le tissu urbain de M'sila est hétérogène dans sa globalité et présente par la suite une distincte adaptation à l'encontre de l'environnement. Le tissu urbain de M'sila est composé de différents types de tissus où chacun a des spécificités qui lui permettent de s'adapter mieux avec le contexte général de l'environnement. Divisée par types de tissus, M'sila est composée de trois types : ancien ; colonial ; contemporain (comprenant les logements collectifs, les lotissements et les équipements).[23]

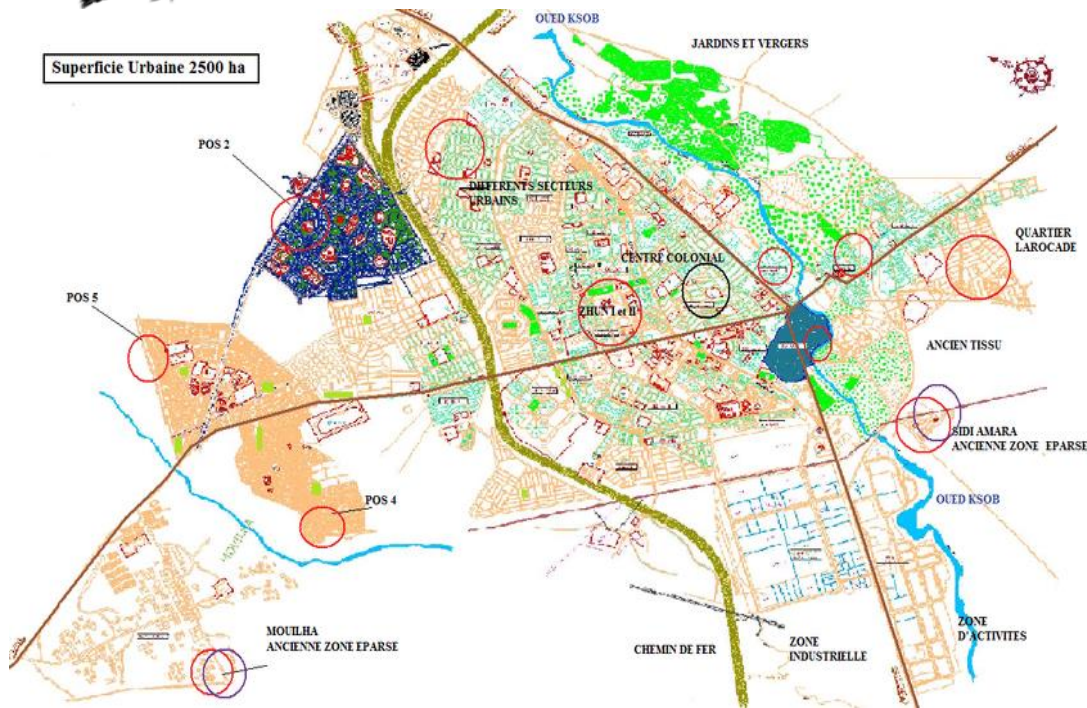


Figure IV.5 : Étalement urbain de la ville de M'sila

Dans ce analyse L'étude de la population est considérée comme l'un des fondements sur lesquels reposent les futurs processus de planification. Elle contribue également à comprendre et à clarifier toutes les relations spatiales et les différentes caractéristiques et liens démographiques, historiques et fonctionnels de la vie humaine. Politiques menées à l'heure actuelle et dans le futur afin de trouver un champ intégré basé sur des fondements logiques selon des plans serrés basés sur la réalité de ce qui existe.

Et aussi la mise au point Urbain Un excellent indicateur de l'attractivité de la ville pour la commune , Le taux de concentration urbaine au niveau de la commune de M'sila était un indicateur important pour déterminer le degré d'attraction dont témoignent les rassemblements urbains, en raison de l'augmentation continue de sa population.

La période entre (1987-1966) : Le taux d'augmentation du taux de la mise au point urbaine était de 0,54%, ce qui est très faible, et la raison en est peut-être la mise à niveau administrative que la ville a reçue au centre de l'État .Ceci est à la lumière de l'exode rural continu en raison du développement des carrières de la ville et de son acquisition d'installations et d'équipements.

La période (après 1987) : Au cours de laquelle, une augmentation significative des

taux de la mise au point urbaine a été enregistrée, de sorte qu'elle a dépassé la moyenne nationale de 49,67% en 1997. Cela peut s'expliquer par le fait que la ville a connu un développement fonctionnel important, surtout après la création de la zone industrielle. qui a travaillé pour attirer la main-d'œuvre, et peut-être que le phénomène de déplacement rural a la meilleure chance d'augmenter le taux de la mise au point urbaine.

Grâce à notre étude des caractéristiques démographiques de la ville de M'sila, nous avons constaté que la ville a connu une forte croissance démographique façonnée par plusieurs variables, notamment les taux élevés d'accroissement naturel et le résultat inévitable de faibles taux de mortalité et de taux de natalité élevés, en plus aux foules humaines que la ville a reçues sous le couvert de ce qu'on appelle la migration.

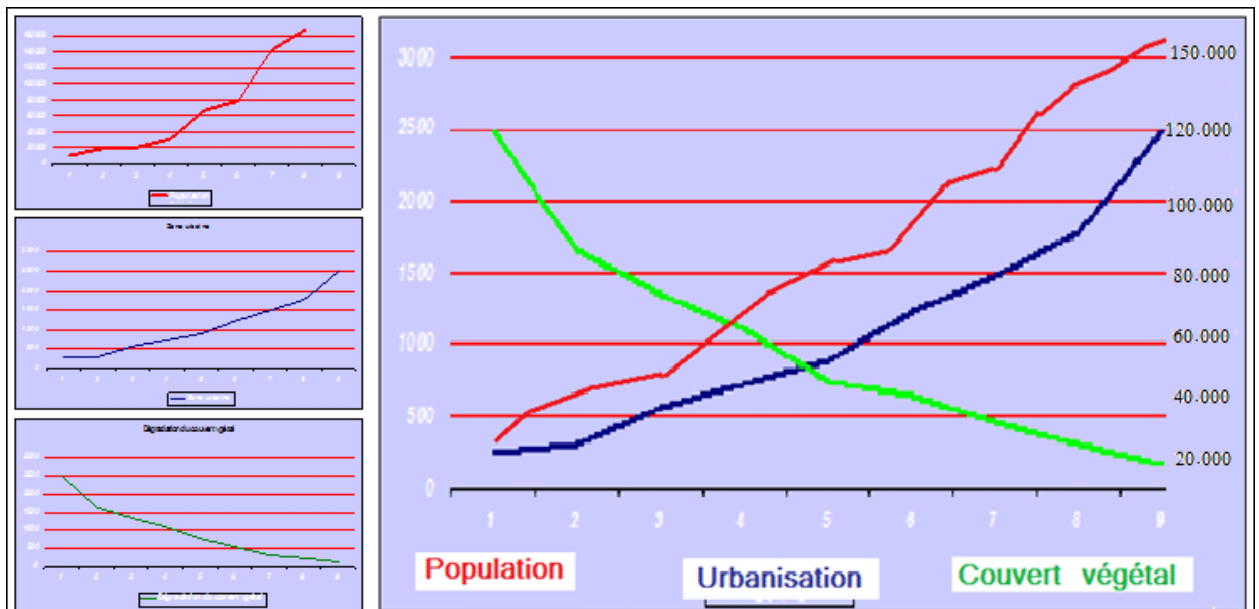


Figure IV.6 : Évolution de la population, urbanisation et ratio des espaces verts urbains de la ville de M'sila.

6. Secteurs de la ville de M'sila

La ville de M'sila contient 5 secteurs :

6.1. premier secteur

Il représente la vieille ville et s'étend sur une superficie de 317,30 hectares, dont 106 hectares d'habitations, 32 hectares d'équipements, 153 hectares de champs et de vergers, et c'est l'hectare le plus ancien en termes de croissance, caractérisé par une croissance discontinue et tissu incohérent et n'est soumis à aucune norme urbaine.



6.2. deuxième secteur

Il représente le centre-ville, et il est situé à l'ouest du premier secteur urbain et adjacent à celui-ci. Il s'étend sur une superficie de 240 hectares, où les logements occupent 72 hectares, 108 hectares pour les équipements, et 60 hectares pour les voiries. Et ce fut le développement et la naissance de son renouveau après l'indépendance.

6.3. Troisième secteur

C'est le secteur qui représente la première nouvelle zone résidentielle urbaine et se situe à l'ouest du deuxième secteur. Il s'étend sur une superficie de 172 hectares, dont 103 hectares sont destinés à l'habitation, 42 à l'équipement. Son origine comme un secteur et en tant que projet remonte au début de 1977.

6.4. Quatrième secteur

C'est le secteur qui représente l'extension naturelle et spatiale de la première nouvelle zone résidentielle urbaine et se situe à l'ouest du troisième secteur, s'étendant sur une superficie de 168 hectares. Ses premières résidences remontent au début de 1989.

6.5. Cinquième secteur

Il représente le dernier demi-cercle du plan de M'sila, formant le flanc occidental, s'étendant sur une superficie de 323,27 hectares, à droite.

6.6. Sixième secteur

Il se compose de l'ancien quartier de Séville, situé au sud, et le secteur est situé à l'extrême ouest de la ville. Il occupe une superficie de 270,75 hectares pour le logement, 34 hectares pour l'équipement et 191 hectares pour la programmation. et des espaces libres.

6.7. Septième secteur

Il est situé au sud de la ville de M'sila et comprend la zone industrielle et la zone d'activités. Il occupe une superficie totale de 2 800 hectares et est considéré comme l'un des obstacles face à l'expansion urbaine.

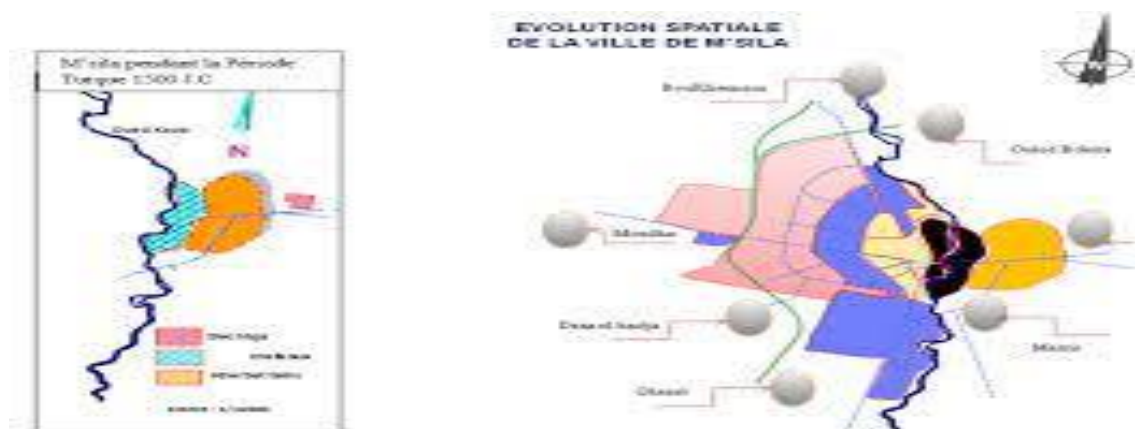


Figure IV.7 : Evolution spatiale de la ville de M'sila



7. Résultats de l'analyse de la ville M'sila

Le résultat auquel nous sommes parvenus en simulant le développement et l'expansion urbaine de la ville de M'sila et le plan d'urbanisme est que c'est cette forme urbaine qui apparaît, à travers le motif géométrique de ses rues, qui divise sa structure et sa composition en parcelles spatiales distinctes. Formé en réponse aux nombreuses circonstances qui l'entouraient, ce qui en fait une entité unique distincte des autres villes. On peut également définir le plan de la ville de M'sila comme la forme générale imposée par la situation et tracée par les différentes étapes du développement urbain de la ville.

Sur la base des données fournies dans les différentes définitions et sur la base de photographies aériennes, de plans et de cartes topographiques, nous avons constaté qu'il existe une grande différence dans le plan de la ville, car la vieille ville est représentée dans les quartiers d'Al-Kush et d'Al-Arqb, Al-Jaafara a une planification non guidée, ses rues et ses ruelles sont étroites et manquent de fondements organisationnels, ce qui se reflète dans l'organisation générale.

De plus, sur la base de données concrètes, nous sommes parvenus à plusieurs faits importants, notamment :

Le plan de la ville M'sila est presque proche de ce style connu sous le nom de plan semi-circulaire, mais cela ne signifie pas qu'il est dépourvu des caractéristiques du plan.

Quant à ce qui nous confirme la suprématie du style de planification semi-circulaire, c'est la division qui est intervenue dans le plan directeur pour la préparation et la reconstruction de la commune de M'sila (P.D.A.U). s'adapte aux conditions spatiales et aux qualifications du lieu, et il est encore utilisé dans Les orientations futures de la ville à ce jour.

8. Conduit à tenir

Pour cette simulation nous avons pris des photos de la ville de M'sila dans les années précédentes de 2012 jusqu'à cette année. On suppose que ces photos est une grille à maillage carré. Nous représenterons cette grille par un matrice en deux dimensions. Chaque case du matrice est appelé cellule. Chaque cellule peut être dans un certain état le nombre d'états différents que peut prendre une cellule est une caractéristique de l'automate considéré,



représenté dans (0,1) qui forment pour nous un matrice binaire, nous avons deux état soit vide avec le numéro 0 ou plein avec le numéro 1.

pour cela on va lancer l instruction qui permet de ouvrir le fichier texte qui représenté l état de chaque photo par un matrice binaire ,Et afficher dans un text area .

Ensuite, pour représenter l'automate sur l'écran, nous devons représenter chaque case du matrice. On choisit généralement de représenter chaque état par un carré de couleur différente.

- Vide : blanc
- Plein : noire

Puis, Nous passons à une étape de l'apprentissage, Dans lequel nous mettons l'état de chaque cellule en fonction de l'état des cellules voisines, c'est-à-dire que chaque état de cellule dépend Sur l'état de ses cellules voisines (et de lui-même) à la date précédente.

En suivant, La partie de la régression de la fonction de transition de l'AC est l'objectif du système que nous proposons de concevoir en utilisant ses états antérieurs extraits des documents de l'administration tutelle. Ces états sont convertis en matrices binaires déterminant les lots occupés et les lots libres.

Le modèle en question consiste en une implémentation d'un algorithme de programmation génétique dont les solutions candidates sont des fonctions booléennes à quatre variables booléennes (les voisins de la cellule : B, F, L, R.) ; les opérateurs sont ceux utilisés dans

l'algèbre de Boole, en l'occurrence : and, or, not ; et les terminaux sont les quatre voisins de la cellule. Une fonction fitness est adoptée pour évaluer les individus de la population.

Un algorithme de PG implémenté est de la forme :

PG_REGRESSION

Initialisation



Evaluation

While (not stopping criterion)

{ selection

Croisement

Mutation

Evaluation

Outpout (meilleure regression).

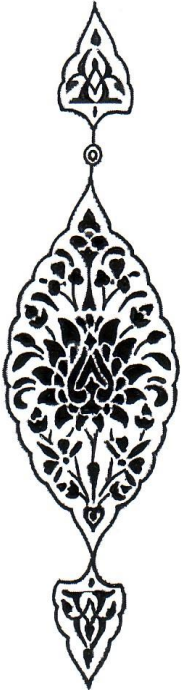
9.Conclusion

Nous avons constaté que le plan à la lumière du quel la ville de M'sila s'est développée est important car il représente un modèle distinct avec des caractéristiques particulières qui lui sont propres par rapport aux autres villes, en raison des différentes circonstances qui ont accompagné les étapes de sa transformation spatiale. et le développement urbain et nous a donné le résultat de l'image actuelle.

À travers l'analyse qui l'a traité sous plusieurs aspects, de l'aspect urbain, qui est représenté dans les étapes du développement de la ville, comme la ville de M'sila a connu une expansion urbaine rapide après l'indépendance et a abouti à de nouveaux quartiers résidentiels et tissus urbains de un caractère moderne.

Chapitre V :

Implémentation et résultats





1.Introduction

Dans ce dernier chapitre en va détaillé sur le coté de programmation et aussi nous allons le tester et réalisé cette modélisation par automate cellulaire on utilisent le logiciel netbeans avec langage Java , plate-forme simple de construction d'automate cellulaire, permettant à l'utilisateur de définir son propre modèle à travers une base de connaissances. Pour cela il doit définir dans un langage élémentaire les différents états cellulaires, les règles de vie et de mort des individus, ainsi que des règles de transition qui définissent la dynamique du système. Il peut gérer des cellules sous forme carrées, différentes topologies : celle de la distance euclidienne qui donne des voisinages en forme de disque, celle de la distance de la somme des écarts (qui donne les voisinages de Von Neumann : 4 voisins pour une cellule carrée), celle induite par la distance du max (qui donne les voisinages de Moore : 8 voisins pour une cellule carrée).

2.Langage de programmation et environnement de développement

Nous avons implémenté notre modèle en utilisant le langage JAVA car, il est considéré parmi

les meilleurs langages qui prennent en charge la véritable programmation orientée objet (OOP), il utilise des processus qui augmentent les performances des entrées/sorties, facilitent

l'internationalisation. En plus, il examine le programme au fil de l'exécution et libère automatiquement la mémoire. Cette fonctionnalité diminue les risques de panne du programme et évite la possibilité de mal utiliser la mémoire.

Notre travail est écrit dans L'environnement de développement NetBeans version 8.2 sous Windows 10 Professionnel. Et nous avons utilisé comme élément matériel un ordinateurs SAMSUNG qui possède les propriétés suivant :

- Un processeur Intel(R) Core(TM) i5-3230M CPU @ 2.60GHz 2.60 GHz .
- Une mémoire vive de 8.00 GB.
- Système d'exploitation 64-bit operating system, x64-based processor.

1.1.Le langage Java

Le langage Java est un langage de programmation orienté objet créé par James Gosling et Patrick Naughton, employés de Sun Microsystems, avec le soutien de Bill Joy, cofondateur de Sun Microsystems.



Java a été officiellement présenté le 23 mai 1995 au SunWorld. La société Oracle racheta alors la société Sun en 2009, ce qui explique pourquoi ce langage appartient désormais à Oracle.

La particularité et l'intérêt de Java réside dans sa portabilité entre les différents systèmes d'exploitations tels que Unix, Windows, ou MacOS.

Un programme développé en langage Java, peut ainsi s'exécuter sur toutes les plateformes, grâce à ses frameworks associés visant à garantir cette portabilité .

1.2.L'environnement NetBeans

NetBeans est l'environnement de Développement Intégré (EDI) supporté par SUN. Il est particulièrement bien adapté pour le développement d'applications WEB. Il remplace l'IDE Java Studio Creator. C'est un IDE moderne offrant un éditeur avec des codes couleurs et un ensemble de signes, des modèles de projets multi-langage et de différents types (application indépendante, distribuée, plugin, mobiles, ...), le refactoring, l'éditeur graphique d'interfaces et de pages web pour supporter le programmeur dans son travail.

Il permet d'accéder rapidement à la documentation détaillée, de naviguer dans les sources et de faire des recherches d'usage des classes, méthodes et propriétés. NetBeans indique à l'utilisateur les erreurs et fait des propositions pour y remédier.

Un débogueur permet l'exécution pas à pas. Un suivi des ressources utilisées (CPU, mémoire) par le logiciel développé peut être fait via un profiler. Un framework de test unitaire tel que Junit Fiche Junit peut être utilisé .

3.Description de logicielle

Le logicielle développé permet de simuler n'importe quel phénomène modélisable par les automates cellulaires, la figure suivant présent son interface principale.



Figure V.1.Interface Principal

Le bouton “ Ouvrir ” il va apporter le fichier texte qui contient la matrice binaire lié à donnée du chaque photos depuis l'ordinateur , et il va afficher sur le texte aria suivant :

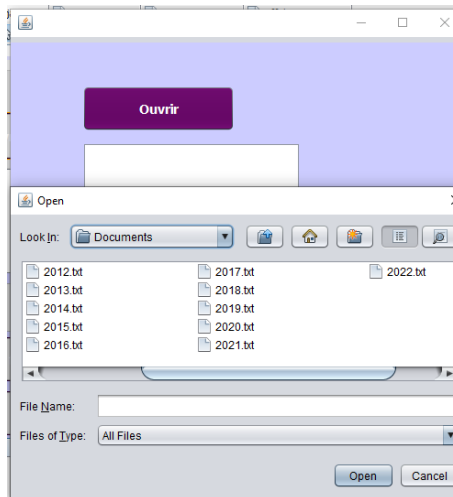


Figure V.2. Apporter le fichier texte

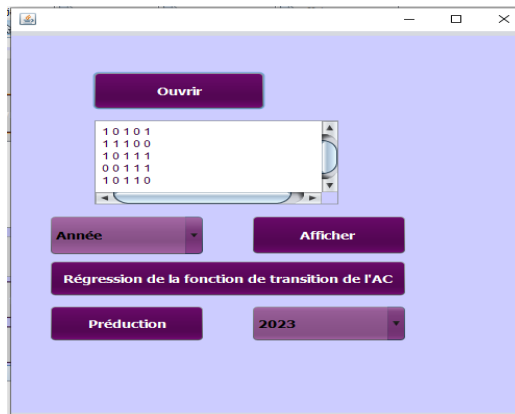


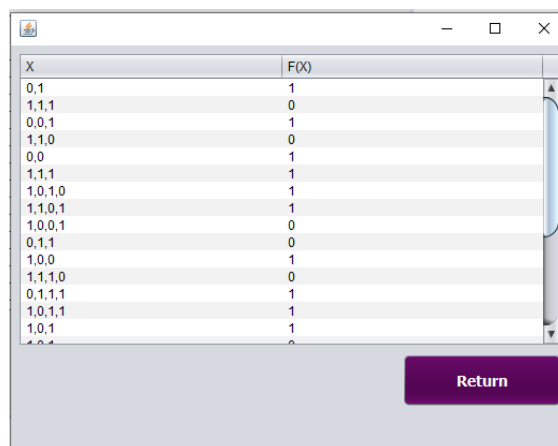
Figure V.3.Affichage de la matrice sur text area

Le bouton “ Afficher ” nous allons à travers dans la présentation de l’automate sur l’écran par un carré de couleur différente (blanc et noire).



Figure V.4.Présentation de l’Automates Cellulaires

chaque présentation il a le tableau du fonction son propre qui représente l'état de chaque cellule en fonction de l'état des cellules voisines Nous allons vers lui via le bouton “ afficher le tableau du fonction ” et apparaît comme ceci :



| X | F(X) |
|---------|------|
| 0,1 | 1 |
| 1,1,1 | 0 |
| 0,0,1 | 1 |
| 1,1,0 | 0 |
| 0,0 | 1 |
| 1,1,1 | 1 |
| 1,0,1,0 | 1 |
| 1,1,0,1 | 1 |
| 1,0,0,1 | 0 |
| 0,1,1 | 0 |
| 1,0,0 | 1 |
| 1,1,1,0 | 0 |
| 0,1,1,1 | 1 |
| 1,0,1,1 | 1 |
| 1,0,1 | 1 |
| 0,0,1 | 0 |

Figure V.5. L’Apprentissage

Nous pouvons également déplacer à travers les données par le combobox en sélectionnant l’année .

Ici, le logiciel contient un ensemble de données relatives aux dernières années de l'état de la ville de M'sila, Ces données nous permettent de construire l'automates cellulaire . Pour cela, nous utilisons un algorithme de programmation génétique pour la régression de la fonction de transition de l'AC lié avec le bouton "régression de la fonction de transition de l'AC".

Puis ,Lors du choix d'une année d'années à venir nous appuyons sur le bouton "Prédiction", il nous montre le résultat attendu.

3.1.Exemple

Apporter le fichier texte " 2013.txt " qui contient la matrice binaire lié à donnée d'état du la ville M'sila en 2013 depuis l'ordinateur , et Afficher :

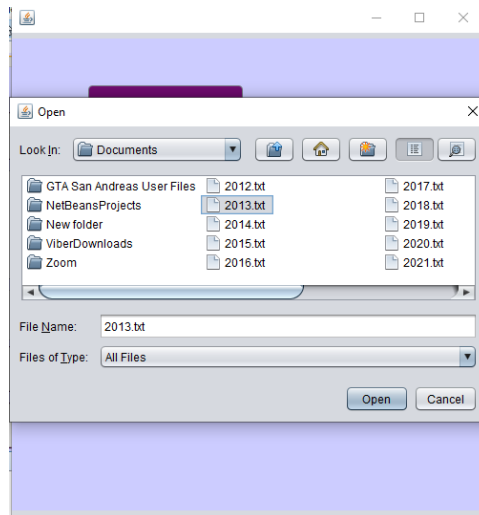


Figure V.6 : Exemple de Apporter le fichier texte

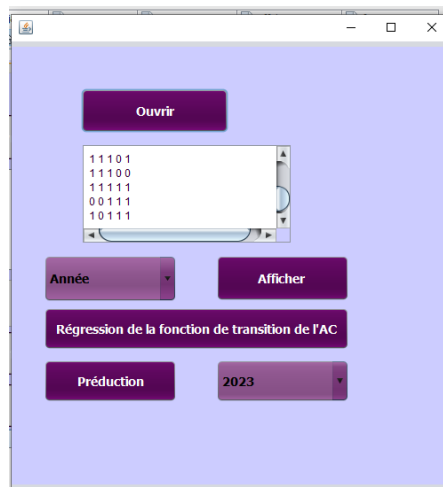


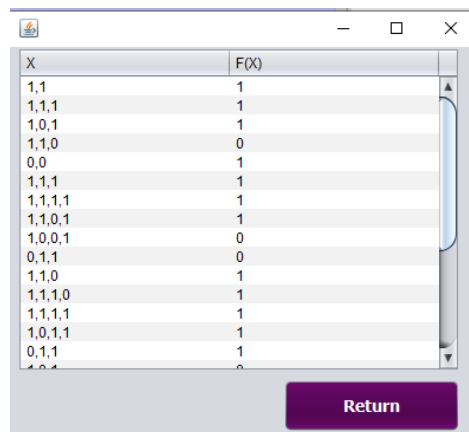
Figure V.7 :Affichage de la matrice d'état de la ville M'sila en 2013

Présentation de l'automate sur l'écran de l'année 2013 :



Figure V.8: l'Automate Cellulaire qui représente l'état de l'année 2013

Son tableau D'apprentissage :



| X | F(X) |
|---------|------|
| 1,1 | 1 |
| 1,1,1 | 1 |
| 1,0,1 | 1 |
| 1,1,0 | 0 |
| 0,0 | 1 |
| 1,1,1 | 1 |
| 1,1,1,1 | 1 |
| 1,1,0,1 | 1 |
| 1,0,0,1 | 0 |
| 0,1,1 | 0 |
| 1,1,0 | 1 |
| 1,1,1,0 | 1 |
| 1,1,1,1 | 1 |
| 1,0,1,1 | 1 |
| 0,1,1 | 1 |
| 1,0,1 | 0 |

Figure V.9 : L'Apprentissage de l'état d'automates cellulaires d'année 2013

Appuie sur le bouton pour calculer la fonction de transition de l'Automates Cellulaires

En choisi l'année futuriste puis appuie sur le bouton " Prédiction " qui afficher le résultat suivant :

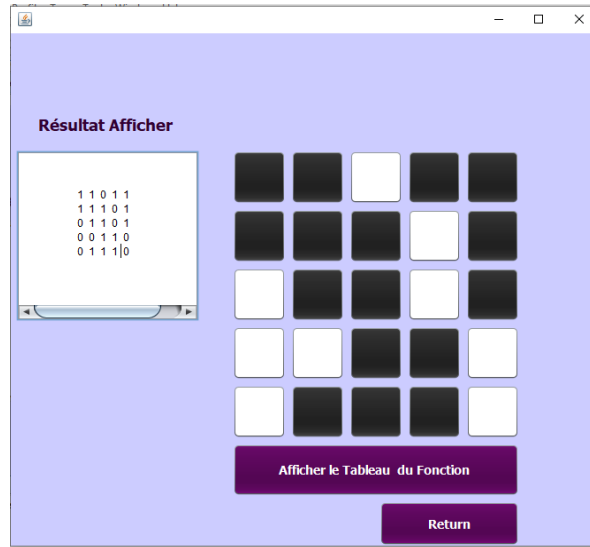


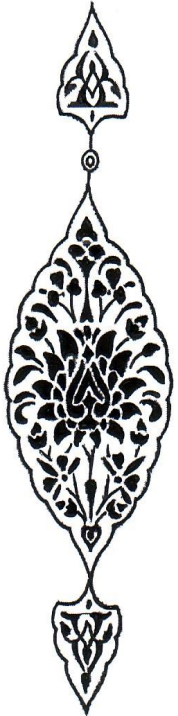
Figure V.10 : Résultat de la Prédiction

4. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre l'application développée, le langage et ses outils utilisés pour résoudre le problème que nous avons couvert dans ce mémoire.

Ensuite, on a présenté l'implémentation de notre application et nous avons considéré et montré des exemples avec les résultats obtenus.

CONCLUSION GENERALE





Conclusion générale

Dans cette mémoire on a travaillé sur le développement de modèles permettant de simuler l'évolution urbaine de la ville m'sila pour prendre des précautions à l'avenir et éviter Surpopulation et urbanisation, compte tenu des conditions de vie et climatiques, etc

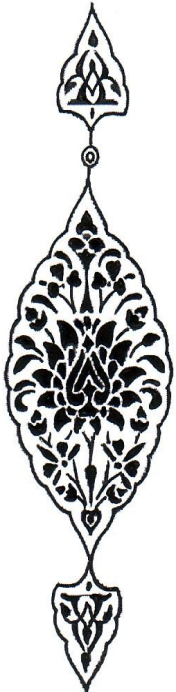
Pour cela on a utilisé les automates cellulaires qui sont des modèles très intéressants dans le monde de simulation avec ses caractéristiques simple et puissants qui permis de simuler plusieurs phénomènes naturels .

Les programmes de simulation sont avant tout un outil de vérification de la justesse d'un raisonnement. En ce sens, ils remplacent l'expérimentation des sciences biologiques ou chimiques. Nous avons évalué dans quelle mesure la croissance urbaine peut être modélisée à l'aide de règles spatiales .

L'outil développé serait un système expert qui Prédire l'avenir urbain d'une ville en simulant le développement urbain des années précédentes et en utilisant la fonction de transition de l'Automates cellulaires D'où nous arrivons à un résultat approximatif pour l'avenir de la ville.

Ce travail doit être considéré comme la première étape d'une démarche plus globale devant fournir aux opérationnels ,Ce pourrait être le début d'un projet réussi et utile pour un avenir meilleur pour la ville, et ce pourrait être le projet sur lequel les ingénieurs et les propriétaires urbains s'appuient pour prendre les précautions nécessaires (source d'eau ,Gaz réseau électrique ,Les installations ...).

Bibliographie





Références Bibliographiques

- [1] Hédia Sammari .“*Développement d’une méthode d’automate cellulaire basé sur une tessellation irrégulière et hiérarchique pour la simulation des processus spatio-temporels*”. Doctorat en sciences géomatiques , Philosophiae doctor (Ph. D.), Québec, Canada 2014.
- [2] Edwige Dubos-Paillard, Patrice Langlois. MODELISER ET SIMULER L’EVOLUTION URBAINE PAR AUTOMATE CELLULAIRE AVEC SPACELLE. Colloque international “*Fabrique de la ville et mutations des formes d’urbanité*”, Université des sciences et de la technologie d’Oran, Dec 2005, Oran, Algérie. halshs-01694314ff.
- [4] Wenzhong Shi · Michael F. Goodchild · Michael Batty · Mei-Po Kwan · Anshu Zhang Editors .” *Urban Informatics* ”. The Urban book Series ,The international Society for Urban informatics.
- [5] KARINE HINS-MALLET.” *AMÉLIORATION DU PROCESSUS DE GÉOSIMULATION DES PHÉNOMÈNES URBAINS COMPLEXES PAR L’ADAPTATION D’UNE TESSELLATION VORONOI* ” . Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l’Université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en sciences géomatiques pour l’obtention du grade de Maître ès Sciences (M. Sc.) , DÉPARTEMENT DES SCIENCES GÉOMATIQUES FACULTÉ DE FORESTERIE, GÉOGRAPHIE ET GÉOMATIQUE UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC 2009.
- [8] LABOUDI Zakaria .” *Evolution d’automates cellulaires par algorithmes génétiques quantiques sur un environnement parallèle*” .Mémoire Pour l’Obtention du diplôme de Magistère en Informatique, Université Mentouri de Constantine Faculté des sciences de l’ingénieur Département d’informatique, Année Universitaire 2008-2009.
- [11] Nicolas Bacquey. ” *Automates Cellulaires : Aspects algorithmiques des configurations périodiques en toute dimension*”. Informatique [cs]. Université de Caen Normandie, 2015. Français. tel-01261424
- [12] Nicolas Ollinger. Automates cellulaires : structures. Autre [cs.OH]. Ecole normale supérieure de lyon - ENS LYON, 2002. Français. tel-00007765f

Bibliographie



[17] Lajoie, G., & Hagen - Zanker, A. H. (2007). La simulation de l'étalement urbain à La Réunion : apport de l'automate cellulaire Metronamica® pour la prospective territoriale. Cybergeog, 405.

[18] MARTIN LALONDE . ” *MODÉLISATION PAR AUTOMATES CELLULAIRES DE BRÈCHES HYDROTHERMALES*” .Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en informatique .Université du QUÉBEC à Montréal , mars 2006.

[21] Mohamed Mili, Hynda Boutabba , Samir-Djemoui Boutabba.”La nature urbaine: dégradation quantitative et qualitative des espaces verts urbains, cas de la ville steppique de M’Sila, Algérie” .urbe Revista Brasileira de Gestão Urbana, vol. 11, 2019.

[22] Hynda Boutabba, Abdallah Farhi et Mohamed Mili . ”Le patrimoine architectural colonial dans la région du Hodna, un héritage en voie de disparition. Cas de la ville de M’sila en Algérie” . L’Année du Maghreb, n° 10, 2014, 269-295.

[23] HAMINA Y. LAKHDAR , L. ABBAS . ”*CROISSANCE DES VILLES ET QUALITÉ ENVIRONNEMENTALE. CAS DE LA VILLE DE M’SILA – ALGÉRIE*”. Université des sciences et des technologies Houari Boumediene, Algérie.

[24] M Batty, H Couclelis, M Eichen,1997,Urban Systems as Cellular Automata.

Webographie

[3] <https://youmatter.world/fr/definition/urbanisation-definition-causes-consequences/>

Visité le : Mars 2022.

[6]<https://fr.wikipedia.org/wiki/Urbanisation#:~:text=L'urbanisation%20est%20un%20mouvement,des%20populations%20dans%20ces%20derni%C3%A8res.>

Visité le : Mars 2022.

[7]https://www.researchgate.net/figure/Modelisation-du-systeme-urbain-La-ville-est-consideree-comme-un-systeme-ouvert-II_fig2_290182671

Visité le : Mars 2022.



[9] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Automate-cellulaire.html>

Visité le : Mars 2022.

[13] [Jeu de la vie — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#)

Visité le : Mars 2022.

[14] <https://natureofcode.com/book/chapter-7-cellular-automata/>

Visité le : Avril 2022.

[15] <https://journals.openedition.org/cybergeogeo/25353>

Visité le : Avril 2022.

[20] [https://babzman.com/msila-la-terre-envahie-par-bien-des-](https://babzman.com/msila-la-terre-envahie-par-bien-des-civilisations/#:~:text=M'sila%20a%20%C3%A9t%C3%A9%20cr%C3%A9e,Sidi%20Ameur%2C%20Bous%20A2ada%20ou%20Tafza)

[civilisations/#:~:text=M'sila%20a%20%C3%A9t%C3%A9%20cr%C3%A9e,Sidi%20Ameur%2C%20Bous%20A2ada%20ou%20Tafza](https://babzman.com/msila-la-terre-envahie-par-bien-des-civilisations/#:~:text=M'sila%20a%20%C3%A9t%C3%A9%20cr%C3%A9e,Sidi%20Ameur%2C%20Bous%20A2ada%20ou%20Tafza). Visité le : Avril 2022.

Abstract

We propose to design a model based on one or more cellular automata to simulate the urban evolution of a city, taking the city of M'sila as a case study. The aim is to collect Google maps chronological images of the city of M'sila, to draw the graph representing the links between these images and then to identify a cellular automaton allowing this evolution to be modeled. The purpose of this theme is to anticipate the future of the city to plan a rational strategy ensuring all the needs of the population while preserving the conditions in force.

Keywords: Cellular Automata; Urban Evolution; Modelization.

ملخص

نقترح تصميم نموذج يعتمد على واحد أو أكثر من الأجهزة الخلوية لمحاكاة التطور الحضري للمدينة ، مع الأخذ في الاعتبار مدينة المسيلة كدراسة حالة. والهدف من ذلك هو جمع خرائط غوغل للصور الزمنية لمدينة المسيلة ، لرسم الرسم البياني الذي يمثل الروابط بين هذه الصور ثم تحديد آلية خلوية تسمح بنمذجة هذا التطور. الغرض من هذا الموضوع هو توقع مستقبل المدينة لتخطيط استراتيجية عقلانية تضمن جميع احتياجات السكان مع الحفاظ على الظروف السارية.

الكلمات المفتاحية : الأجهزة الخلوية ؛ التطور الحضري ؛ النمذجة.

Résumé

On se propose de concevoir un modèle basé sur un ou plusieurs automates cellulaires pour simuler l'évolution urbaine d'une ville en prenant comme cas d'étude la ville de M'sila. Il s'agit de collecter des images chronologiques Google maps de la ville de M'sila, de dresser le graphe représentant les liens entre ces images puis dégager un automate cellulaire permettant de modéliser cette évolution. Le but de ce thème est d'anticiper le devenir de la ville pour prévoir une stratégie rationnelle assurant toutes les nécessités de la population tout en préservant les conditions en vigueur.

Mots-clés : Automate Cellulaire ; Evolution Urbaine ; Modélisation.

