

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mohamed Boudiaf-M'sila

FACULTE : Maths & Informatique

DEPARTEMENT : Informatique

N° :



DOMAINE : Mathématiques et informatique

FILIERE : Informatique

OPTION : SIGL

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : Benlatreche abdelouahab

Intitulé

Modélisation de feux de forêts par
Automates cellulaires

Soutenu devant le jury composé de :

.....	Université de M'sila	Président
Barkat Abdelbasset	Université de M'sila	Rapporteur
.....	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2019 /2020

REMERCIEMENTS

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

Je remercie mon amis Rabie DIF pour son aide dans la coté programmation et pour ses conseils techniques, mille merci frère.

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

DEDICACE

Je dédie ce travail à :

Mes parents

A mon épouse et mes enfants Lina, Nouh et Roaa.

A mes frères et mes sœurs.

A mes amis.

A tous mes professeurs.

Résumé

Les feux de forêts représentent un risque majeur pour de nombreux pays dans le monde. Outre les pertes de vie humaines, ils occasionnent des dégâts environnementaux et économiques (destruction de biens d'habitation), dont l'étude nécessite de disposer de données adéquates et suffisantes pour suivre le changement aux niveaux spatial et temporel. La modélisation de cette complexité contraint de visualiser la dynamique spatio-temporelle, c'est-à-dire d'identifier des éléments de l'espace susceptibles de décrire la réalité du terrain et de percevoir le changement avec suffisamment de finesse.

La modélisation du feu de forêt par des méthodes mathématiques est de plus en plus difficile et n'est pas maîtrisable que par des mathématiciens. Par ailleurs, une nouvelle manière de modélisation développée au milieu du XXe siècle, à travers des travaux théoriques de nombreux chercheurs comme, Turing, Ulam, Von Neuman, Chomsky, et bien d'autres. Cette manière n'utilise pas les équations mathématiques (les équations différentielle ou linéaires) mais basée sur des règles élémentaires, règles spatiales simples, formulées à partir de nos connaissances empiriques reproduisent la réalité et la complexité du monde réel par le fonctionnement d'une machine formelle. Dans ce contexte, qu'apparut le concept d'automate cellulaire.

Notre travail s'inscrit dans cette problématique de conception d'un Système qui permet de modéliser du feu de forêt par des simples règles. En d'autres termes, il s'agit de proposer un modèle d'automates cellulaires permet d'expliquer l'évolution des feux et de prétendre leur futur.

Mots clés : feu de forêt, modélisation, Automates cellulaires, Analyse spatio-temporelle

Abstract

Forest fires are a major risk for many countries around the world, In addition to the loss of human life; they cause environmental and economic damage (destruction of residential property). Whose study requires the availability of adequate and sufficient data to follow the change in spatial and temporal levels? Modeling complexity forced to visualize the spatiotemporal dynamics, that is to say, to identify elements of the space that could describe the reality on the ground and collect change with enough finesse.

Modeling of Forest fires using mathematical methods is becoming more difficult and is not manageable only by mathematicians. Furthermore, a new modeling so developed in the mid twentieth century, through theoretical work of many researchers as Turing, Ulam, von Neuman, Chomsky, and others. This method does not use mathematical equations (or linear differential equations) but based on simple rules, simple spatial rules formulated from our empirical knowledge reproduce the reality and complexity of the real world by the operation of a machine formal. In this context, it appeared the cellular automaton concept.

Our work is part of this problem of designing a system for modeling Forest fires by simple rules. In other words, it is to propose a model of cellular automata can explain the evolution of fires and claim their future.

Keywords: Forest fires, modeling, cellular automata, spatial and temporal analysis

Table des matières

Introduction générale

1. Contexte	10
2. Problématique et objectif	12
3. Organisation du mémoire	14

Chapitre I : Modélisation de feux de forêts

1. Introduction	17
2. Définitions d'un feu de forêt.....	17
3. Les types de feux de végétation.....	18
3.1 Les feux de sol.....	18
3.2 Les feux de surface	18
3.3 Les feux de cimes	18
4. les causes d'un incendie	18
5. Modélisation des feux de forêt	19
5.1 Geosimulation	19
5.2 Systèmes complexes	20
5.3 Transdisciplinarité	20
6. Les principales approches de modélisation	21
6.1 L'approche purement physique.....	21
6.1.1 Technique de propagation des ondes ou propagation elliptique.....	21
6.2 L'approche empirique	24
6.3 L'approche intermédiaire	24
6.4 L'approche réseau	24
6.4.1 Technique de percolation.....	26
6.4.2 Technique des automates cellulaires	27
7. Les principaux simulateurs.....	27
8. Conclusion	28

Chapitre II : les automates cellulaires

1. Introduction	30
2. Les AC dans la littérature	30
2.1 Définition	32
2.2 Exemple.....	33
2.3 Caractéristiques et propriétés.....	34
2.3.1 Caractéristiques techniques	34
2.3.2 Caractéristiques fonctionnelles.....	37
2.3.3 Propriétés.....	38
3. Le jeu de la vie.....	41
4. Automates cellulaires élémentaires.....	43
5. Classification de WOLFRAME.....	47
6. Domaines d'application.....	49
7. Conclusion.....	51

Chapitre III : la modélisation par automates cellulaires

1. Introduction	53
-----------------------	----

2. État de l'art : automates cellulaires et simulation géographique	53
3. Conclusion.....	56
 Chapitre IV : réalisation et test	
1. Introduction	58
2. Principes d'utilisation	58
3. Description de logicielle	58
3.1. Le menu "File".....	59
3.2. Le menu "Configuration".....	59
3.3. Le menu "Simulation".....	60
3.4. Initialisation automatique de maille	60
3.5. Le menu "AC1D".....	61
3.6. Le menu "Help".....	62
4. La synchronisation des transitions	62
5. Choix d'un type de configuration initiale	62
6. Terminologies.....	62
7. Principes de fonctionnement.....	63
8. Transformation des cellules : les transitions.....	64
9. Forces d'interaction.....	64
9.1. Calcul d'une force de transition	65
9.2. Mécanisme de transition.....	65
10. Syntaxe des règles de la base de connaissance de l'automate Cellulaire.....	65
 Conclusion générale	 67
Annexe A Grammaire du langage ACG.....	68
Annexe B Les Forces d'interaction.....	71
Annexe C Règles de transitions.....	73
 Bibliographie	 74

Table de figures

Fig 1.1 Fonctionnement générale de l'application.....	VIII
Fig 1.2 Exemple de lutte contre feu de forêt	19
Fig 1.3 Propagation à partir d'un point d'ignition (O)	22
Fig 1.4 Principe de construction des périmètres de front de flammes avec la méthode Elliptique.....	23
Fig 1.5 Effet du vent sur la forme d'un front de flammes	24
Fig 1.6 Propagation du feu sur une grille d 'éléments	25
Fig 2.1 Capture d'écran de l'implémentation de la machine universelle	30
Fig 2.2 Composants d'un automate cellulaire	33
Fig 2.3 Exemples de diagrammes espace-temps d'automates cellulaires.....	33
Fig 2.4 espace 2D d'automates cellulaires	34
Fig 2.5 voisinage de Von Neuman et de Moore	35
Fig 2.6 voisinage de Moore etendu et de Margolus	35
Fig 2.7 variation de voisinage de Von Neuman	36
Fig 2.8 voisinage des cellules de bord	36
Fig 2.9 Machine de Turing de Von Neumann	38
Fig 2.10 propriété de reproduction	39
Fig 2.11 l'automate déplacement Est	39
Fig 2.12 automate de type jeu de la vie	40
Fig 2.13 règle de survie dans jeu de la vie	41
Fig 2.14 règle de mort dans jeu de la vie	41
Fig 2.15 règle de naissance dans jeu de la vie	42
Fig 2.16 exemple de jeu de la vie	42
Fig 2.17 exemple de jeu de la vie	43
Fig 2.18 évolution de la règle 254	45
Fig 2.19 évolution des règle 250 et la règle 50	45
Fig 2.20 évolution de la règle126	46
Fig 2.21 évolution de la règle 30	46
Fig 2.22 les 256 automates de Wolframe	48
Fig 2.23 : Exemple de codage d'un message par un automate cellulaire.....	50
Fig 4.1 interface principale de logicielle.....	59
Fig 4.2 Le menu "File"	59
Fig 4.3 Le menu "Configuration"	60
Fig 4.4 Le menu "Simulation"	60
Fig 4.5 Initialisation automatique de maille	61
Fig 4.6 automate cellulaire 1D ,la regle 126	61
Fig 4.7 Le menu "Help"	62

liste des tableaux

Tab1.1 Les principaux simulateurs28

Tab 2.1 nombre de règles possibles selon nombre de voisin et nombre d'états37

Introduction générale

« Le monde qui nous environne est peuplé de systèmes qui, par leur complexité, échappent aux modes de pensée cloisonnés et aux outils classiques de modélisation. La collection « Systèmes complexes » est à promouvoir le rapprochement des disciplines de la biologie, de l'informatique, des mathématiques, de la physique, des sciences cognitives et sociales, dans le but de mieux appréhender et de mieux maîtriser le fonctionnement de ses systèmes dits complexes. Elle constitue un support nouveau pour la diffusion d'idées et de concepts développés ou se développant dans un contexte transdisciplinaire. » [1]

« André Langlois, Michel Phipps »

1. Contexte

Les feux de forêt occasionnent des dégâts environnementaux et économiques (destruction de biens d'habitation et de moyens de lutte contre les feux). Ils sont la cause de déforestations et de désertifications, et polluent l'air : les émissions de CO₂ lors d'un feu de forêt représentent 20 % des émissions totales. Ces dernières années, le feu a engendré de nombreuses catastrophes dans le monde entier : au début de l'année 2013 en Australie, plus de 200 km² de forêts et de terres agricoles ont été détruits par un incendie qui a contraint 2 000 personnes à quitter leur logement. Au cours de l'été 2012, un feu en Espagne a causé la mort de 4 personnes et brûlé près de 130 km².

En Algérie, chaque année en moyenne plus de 36.000 hectares de forêts sont détruits par les feux. Les pertes économiques dans le secteur forestier générées par ces feux, entre 1985 et 2006, se chiffrent à plus de 113 milliards de dinars algériens. Cette évaluation financière ne prend en compte que la valeur marchande des produits perdus (bois, liège, broussailles, alfa, arboriculture...), sans tenir compte des dépenses annuelles pour la lutte. De plus, il faut ajouter à cela une perte à long terme de la biodiversité et de l'équilibre des écosystèmes forestiers qui reste difficile à chiffrer. La prévention et la détection précoce constituent les seuls moyens de réduire le coût des dégâts causés.[2]

La politique forestière pratiquée en Algérie commence depuis une dizaine d'années à s'inspirer de l'expérience des pays avancés dans le domaine, et à prendre en considération les innovations scientifiques en matière de gestion et protection du patrimoine forestier. Les cartes réalisées de manière traditionnelle ne sont plus adaptées aux besoins actuels. La complexité et la

diversité des données relatives à l'environnement ont favorisé le développement de systèmes capables de répondre aux besoins de collecte, d'analyse et de représentation de phénomènes environnementaux. Les SIG (Systèmes d'information géographique) et la télédétection sont devenus des outils incontournables pour la compréhension et le suivi des phénomènes dynamiques comme les feux de forêts et permettent de disposer d'arguments valables pour la prise de décisions.

On se trouve, en effet, à la croisée de plusieurs domaines scientifiques ou techniques :

- la physique (phénomènes de combustion, mécanique des fluides, ...),
- la météorologie (prévision du risque, modélisation du vent, ...),
- la biologie (milieu végétal),
- la protection contre le feu. (Aménagement forestier, lutte contre les incendies, ...),
- l'informatique (éléments finis, traitement des images, interface,).

Quelle largeur et quelle position doivent avoir les grandes coupures d'un massif forestier pour être "étanches" aux feux propagés par le Mistral ? Quelle surface maximale doivent couvrir les patrouilles forestières les jours de risque très sévère pour que leur première intervention permette de maîtriser le feu en attendant l'arrivée des secours ? Quelles sont les zones à haut risque d'un massif forestier à surveiller en priorité ?

L'incendie de forêt est un phénomène complexe pour lequel il est difficile de faire - pour l'instant de l'expérimentation en vraie grandeur. De ce fait, les décisions prises pour la défense de la forêt l'incendie s'appuient rarement sur des bases solides. Au mieux sur l'expérience, au pire sur le hasard ... des financements.

Certains actes révèlent simplement du bon sens. Mais, de l'avis de la plupart des experts, chercheurs ou gestionnaires 'orienter vers une plus grande maîtrise de l'événement, suppose d'abord de pouvoir le prédire. La clé du problème tient en grande partie en un mot : simulation. Le simulateur de feu s'avère être l'outil actuellement manquant pour conduire une véritable stratégie de protection de la forêt dans chaque massif.

L'évolution d'un feu de forêt, ne se fait plus de manière planifiée ou hiérarchique. Il devient extrêmement difficile de comprendre et de maîtriser la forme et l'évolution du feu d'aujourd'hui, régie par ses propres lois. Nous avons affaire à un système complexe, dynamique, autogène. Les systèmes développés aujourd'hui pour modéliser les feux de forêts et en simuler son développement sont insuffisants.

Dès lors, des questions essentielles demeurent : Que peut-on prédire de l'évolution d'un feu ? Comment gérer son évolution et prendre des décisions ajustées ? Quelles sont les avancées

informatiques les plus prometteuses pour intégrer toutes les données nécessaires et tenter de répondre à ces questions ?

Les 20 dernières années ont connu de nombreux développements de modèles physiques et mathématiques appliqués à l'étude et à la simulation de phénomènes incendie de forêts (croissance, évolution, émergence). La majorité de ces modèles repose sur des modèles mathématiques complexes (équations différentielles, intégrale, etc....) Qui ne sont maîtrisés que par des experts.

Afin de contourner cette complexité, les travaux se sont orientés vers la modélisation de l'évolution d'un paysage y compris des feux de forêts, en utilisant des modèles simples.

L'idée de base de ce travail repose donc sur la mise en œuvre d'un système à base de connaissances empiriques, permettant au modélisateur d'expérimenter virtuellement, pour voir quel est le résultat spatial de tel ensemble de règles ; ses conséquences dans le temps, lui donnant ainsi une possibilité de valider ses hypothèses, de modifier ou confirmer ses idées sur le fonctionnement du feu de forêt ou de tout autre espace.

Ceci peut être réalisé en utilisant le concept d'Automate Cellulaire Géographique (ACG) inspiré des automates cellulaires dont l'origine remonte à la fin des années 1940. [3]

La notion d'automate ne peut se réduire à une définition purement mathématique, il faut lui adjoindre un aspect spécifiquement informatique : c'est celui du fonctionnement. En effet, les mathématiques définissent des objets, des propriétés, démontrent des théorèmes à travers des écrits statiques. Ces objets ne fonctionnent pas, n'agissent pas en eux-mêmes. Même si les mathématiques peuvent étudier les propriétés d'un fonctionnement, elles ne peuvent produire un « fonctionnement formel ».

De nombreux travaux ont montré la pertinence de l'utilisation des automates cellulaires dans des domaines aussi variés que la physique fondamentale, la croissance végétale, la biologie, la robotique, la dynamique des fluides, etc

2.Problématique

Afin de réduire la complexité du feu de forêt et d'étudier l'évolution des feux dans l'axe de temps et l'axe d'espace cette complexité, les travaux se sont orientés vers la modélisation de l'évolution d'un paysage y compris feu de forêt en utilisant nouvelles réflexions et de nouveaux outils simples de modélisation.

L'idée de base de ce travail repose donc sur la mise en œuvre d'un système à base de connaissances empiriques, permettant au modélisateur d'expérimenter virtuellement, pour voir

quel est le résultat spatial de tel ensemble de règles ; ses conséquences dans le temps, lui donnant ainsi une possibilité de valider ses hypothèses, de modifier ou confirmer ses idées sur le fonctionnement des feux de forêts ou de tout autre espace.

Nous présenterons ici de développer un système à base d'automates cellulaires pour l'étude de l'évolution d'incendie de forêt.

Objective

Le travail est essentiellement orienté « conception logicielle ». L'objectif envisagé est le développement graduel d'une plateforme à base d'automates cellulaires permettant de suivre l'évolution et en modéliser l'évolution future des incendies de forêt, pour atteindre cet objective le logicielle doit permettre :

- De réaliser l'affectation automatique de valeurs sur les champs de mailles soit à partir
- D'une analyse visuelle, soit à partir d'une classification d'image et récupération des indices de classes ;
- De définir les états, leur couleur et de produire des règles de vie
- De produire des règles de transition d'une position temporelle à la suivante ;
- De déterminer les surfaces de chaque classe, à chaque position temporelle ;

Le but de ce travail est de développé un univers virtuel pour faire exercer des simulations sur le phénomène de feu de forêt.

Démarche

Notre but n'était pas de développer de nouvelles techniques de modélisations des incendies de forêts dynamique, mais de mettre en œuvre des méthodes à base d'automates cellulaires pour obtenir des simulations visuelles. Nous avons construit un système dynamique qui utilise des règles simples proches du langage naturel et facile à formuler, qui permet de nous donne des présentations visuelles de l'état futur de paysage simuler.

Les principales étapes de ce système sont (image 1) :

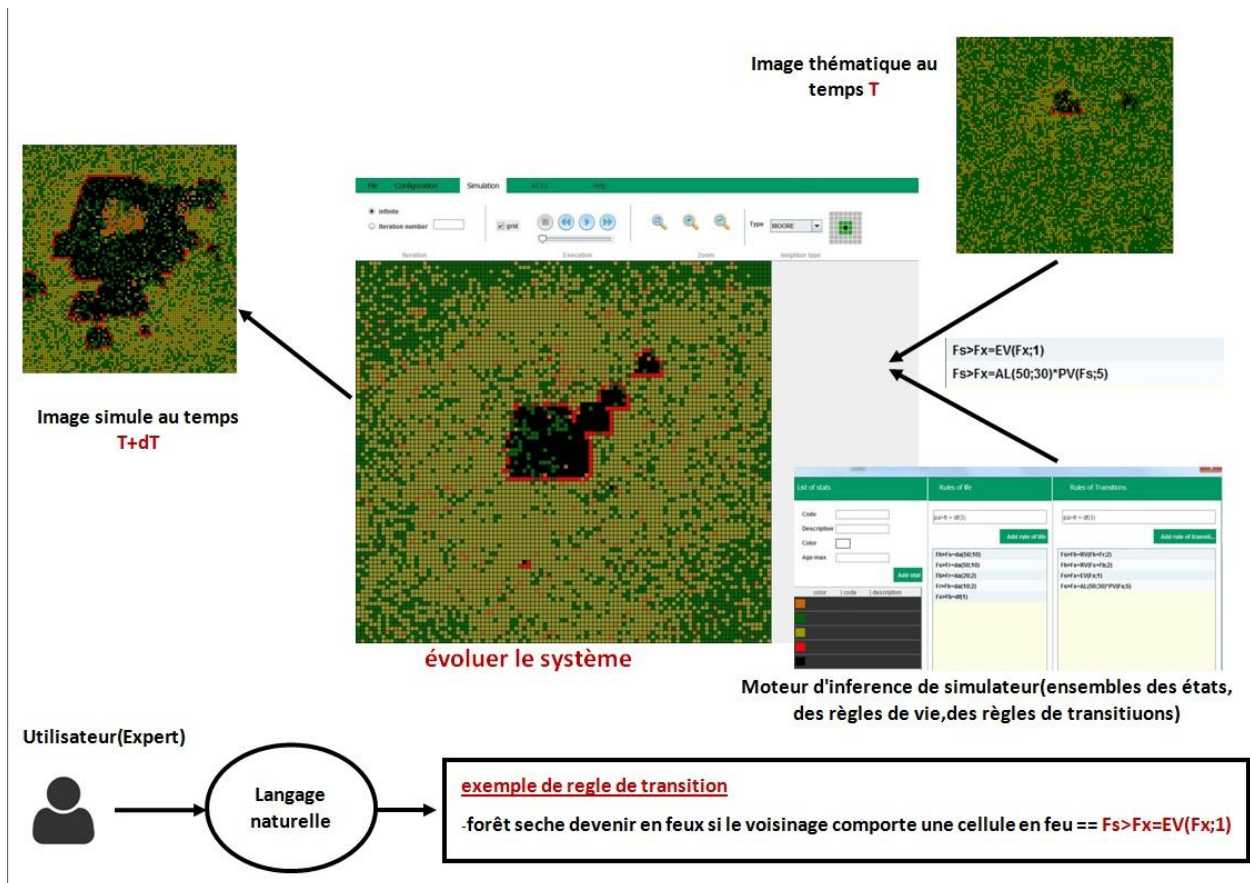


Fig. 1.1 fonctionnement générale de l'application

1. Lire une image thématique au temps t
2. Définit la base des états et des règles (transition et de vie) par l'utilisateur(expert)
3. Reformuler les règles de vie et de transitions en langage de simulateur (voir annexe)
4. Initialisé le maillage de manière automatique
5. Faire tourner la simulation
6. Exporté une image au temps $t+dt$

3.Organisation de la mémoire

Pour résumer, notre objectif à travers cette mémoire est d'aborder la question de modélisation de feu de forêt. Ce phénomène ayant des propriétés intéressantes pour la modélisation sur automates cellulaires, on a organisé cette mémoire de la manière suivant.

Au Chapitre 1, c'est un panorama où se définit le cadre formel de la thèse. Dans un premier temps, il situe notre positionnement vis-à-vis autres méthodes qui touchent ce type de problème come

(Approche systémique, Théorie de graphe, Equations différentielle, Système multi agents, Méthode hybride). C'est l'occasion de revoir les fondements du feu de forêts.

Au chapitre 2, présente une étude détaillée des automates cellulaire, de sa définition, caractéristiques techniques et fonctionnelles on arrive à donner des exemples et on termine par les domaines d'application.

- Le Chapitre 3 on présente un état de l'art sur l'utilisation des automates cellulaires dont la modélisation géographique, ensuite on va présenter notre travaille et le modèle définit.
- Au Chapitre 4, nous décrivons le simulateur qui a été créé, dans cette partie on définit la grammaire utilisé pour traduire les règles de transition et de vie. Ainsi que le format d'écriture des règles, on décrit les étapes de faires des simulations depuis la création et l'initialisation de maillage à la définition des états et règles. Des scénarios et tests ont été présenté.

Chapitre 1

Modélisation de feux de forets

Plan détaillé du chapitre

1. Introduction	17
2. Définitions d'un feu de forêt.....	17
3. Les types de feux de végétation.....	18
3.1 Les feux de sol.....	18
3.2 Les feux de surface	18
3.3 Les feux de cimes	18
4. les causes d'un incendie	18
5. Modélisation des feux de forêt	19
5.1 Geosimulation	19
5.2 Systèmes complexes	20
5.3 Transdisciplinarité	20
6. Les principales approches de modélisation	21
6.1 L'approche purement physique.....	21
6.1.1 Technique de propagation des ondes ou propagation elliptique.....	21
6.2 L'approche empirique	24
6.3 L'approche intermédiaire	24
6.4 L'approche réseau	24
6.4.1 Technique de percolation.....	26
6.4.2 Technique des automates cellulaires	27
7. Les principaux simulateurs.....	27
8. Conclusion	28

1. Introduction :

Les incendies de forêts, ne se fait plus de manière planifiée ou hiérarchique, mais plutôt horizontalement. Il devient extrêmement difficile de comprendre et a fortiori de maîtriser sa forme d'évolution aujourd'hui, régie par ses propres lois. Nous avons affaire à un système complexe, dynamique, autogène. Les systèmes développés aujourd'hui pour modéliser le feu de forêts et en simuler son développement sont insuffisants. L'analyse et la modélisation des complexes représentent un enjeu scientifique fondamental répondant à de nombreuses demandes d'organismes et d'acteurs impliqués dans lutte contre feu de forêts (planification, aménagement, ...).

Analyser, modéliser, simuler, optimiser, prédire, sont des mots de plus en plus courants dans les discours, pas seulement scientifiques. Les 30 dernières années ont connu de nombreux développements de modèles physiques et mathématiques appliqués à l'étude et à la simulation de feux des forêts (croissance, évolution) qu'elle soit spatiale ou temporelle – a pu être partiellement modélisée par un jeu de stratifications créant une disparité formelle émergeant d'un écosystème artificiel et partiellement construit. Du fait de la multiplicité, de la variété et des oppositions possibles entre les acteurs et les facteurs en jeu.

Dès lors, des questions essentielles demeurent :

Que peut-on prédire de le feu eu temps ? Comment gérer son évolution et prendre des décisions ajustées Quelles sont les avancées informatiques les plus prometteuses pour intégrer toutes les données nécessaires et tenter de répondre à ces questions ?

Avant de pouvoir aider des acteurs de lutte contre le feu de forêt à analyser, concevoir et décider, il faut comprendre la nature des phénomènes. Il s'agit d'un premier objectif, analytique, qui ne peut être réalisé que progressivement.

2. Définitions

2.1. Un feu de forêt est un phénomène de combustion mobile qui s'étale à partir d'un point d'allumage en laissant derrière des brûlis.

2.2. On parle d'incendie de forêt lorsque le feu couvre une surface minimale de 0,5 hectare d'un seul tenant et qu'une partie au moins des étages arbustifs et/ou arborés est détruite. Le terme incendie vaut aussi pour les formations subforestières de plus petites tailles que sont le maquis, la garrigue et les landes.

3. Les types de feux de végétation

Un feu peut prendre **différentes formes** selon les caractéristiques de la végétation et les conditions climatiques dans lesquelles il se développe.

3.1 Les feux de sol. Ils brûlent la matière organique contenue dans la litière, l'humus ou les tourbières. Alimentés par incandescence avec combustion, ces feux ont une faible vitesse de propagation.

3.2 Les feux de surface. Ils consomment les strates basses de la végétation et se propagent en général par rayonnement ou convection. Ils affectent la garrigue ou les landes.

3.3 Les feux de cimes. Ils atteignent la partie supérieure des arbres (ligneux hauts) et forment une couronne de feu qui libère en général de grandes quantités d'énergie. Leur vitesse de propagation est très élevée et ils sont particulièrement intenses et difficiles à contrôler lorsque le vent est fort et le combustible sec.

4. les causes d'un incendie

Un feu de forêt peut être d'**origine naturelle** (dû à la foudre ou à une éruption volcanique) **ou humaine** : soit de manière intentionnelle, soit de manière accidentelle (barbecue, mégot de cigarette, feu d'écobuage mal contrôlé, travaux...). Il peut également être provoqué par des infrastructures (ligne de transport d'énergie, dépôt d'ordure, ligne de chemin de fer, etc.).
Comment se développe un incendie?

Pour qu'il y ait inflammation et combustion, trois facteurs doivent être réunis :

- Présence d'un **combustible** (n'importe quel matériau pouvant brûler) ;
- Présence d'une **source externe de chaleur** (flamme ou étincelle) ;
- Présence d'**oxygène** pour alimenter le feu.

5. Modélisation des feux de forêt

La lutte contre les feux de forêt est d'autant plus efficace qu'il est possible d'anticiper leurs comportements au cours du temps, grâce à des modèles mathématiques



Fig 1.2 exemple de lutte contre feu de forêt

5.1 Geosimulation

Désigne un ensemble de concepts, méthodes, et techniques, qui combinent les apports de l'intelligence artificielle et des sciences de l'information géographique, pour simuler la dynamique de systèmes.

Ce terme est apparu il y a quelques années seulement (vers 2000). Il a émergé à peu près simultanément dans différentes équipes de géographie et de géomatique, avec quelques nuances quant au champ recouvert. Si l'étymologie renvoie de façon très générale à la simulation de ce qui est à la surface de la terre, les utilisateurs de ce terme font référence à un champ plus précis dont le développement a été rendu possible par les progrès de l'informatique. La première spécificité est de développer le modèle utilisé au niveau des objets élémentaires, c'est à dire les objets qui peuvent être considérés comme des atomes relativement au phénomène étudié, et qui sont donc conceptuellement indivisibles. Ces objets ont des comportements, ils sont capables d'agir, et leurs actions, simultanées et le plus souvent interactives, produisent des structures spatio-temporelles qui font sens à un autre niveau d'observation. Il s'agit ainsi de formaliser, à l'aide de règles, les comportements de ces entités élémentaires et la méthodologie le plus souvent adoptée est celle des automates cellulaires. Les présupposés de cette technologie, issue de l'intelligence artificielle, mettent l'accent sur le rôle des interactions locales entre cellules et sur l'émergence de structures durables complexes à d'autres niveaux d'organisation. Ils insistent sur les mécanismes de voisinage, et d'un état interne de cellule ainsi que sur des règles d'évolution simples. Ces propriétés ont influé sur la façon dont de nouveaux modèles ont été développés en sciences humaines et sociales et en particulier en géographie, mettant l'individu au coeur de la simulation et les mécanismes « bottom-up » à la base de la compréhension des structures spatiales.

La plupart des modèles correspondent à l'élaboration d'un monde artificiel dans lequel des cellules aux comportements relativement simples, interagissent, prennent des décisions en fonction de leurs caractéristiques propres, et de leur environnement.. D'un point de vue méthodologique les automates cellulaires sont souvent utilisés conjointement avec les systèmes multi-agents. Ils permettent de formaliser l'espace sous la forme d'une grille régulière de cellules, chacune d'entre elles étant caractérisée par un état, état évoluant en fonction des caractéristiques des cellules voisines suivant des règles de transition.

La plupart de ces modèles de geosimulation ont pour objectif de reproduire un fait spatial stylisé et utilisent un espace cellulaire et un mécanismes d'interaction et d'évolution très simples.

5.2 Systèmes complexes :

On peut dire que la ville est la résultante d'un ensemble de facteurs agissant à différents niveaux et dans différentes configurations locales, activant l'un ou l'autre des possibles inscrits dans ce que l'on pourrait appeler son « patrimoine génétique ». Il convient donc d'étudier non seulement la dynamique formelle des ensembles urbains mais également les interactions complexes qui ont lieu entre ce niveau local et le niveau global et qui régissent pour partie cette dynamique formelle. Dans cette optique, il paraît nécessaire de mobiliser les méthodes et les techniques d'analyse des systèmes complexes.

5.3 Transdisciplinarité

Dans une telle perspective, plusieurs disciplines sont interpellées, tant pour la modélisation et l'analyse des éléments formels (théorie des graphes pour l'analyse des réseaux urbains, mathématiques fractales et topologie..), de leur dynamique formelles (mathématiques de l'émergence des formes et des systèmes complexes, automates cellulaires, etc.) que pour l'étude des interactions avec les phénomènes socio-historiques (pratiques sociales inscrites dans le territoire, formes de représentation de l'espace et de ses possibles évolutions, normatives et interventions institutionnelles, mémoires et réactualisations, etc.).

L'approche systémique pour modéliser le feu de forêt est ancienne. Le concept d'auto-organisation et le formalisme des équations différentielles ont donné lieu à de nombreuses applications dans les années 1980. La simulation par automates cellulaires ouvre de nouvelles perspectives dans ce champ.

6. Les principales approches de modélisation

Les modèles de feux de forêt sont basés soit sur l'analyse mathématique de la physique fondamentale et des procédés chimiques qui contrôlent la propagation des feux, soit sur le principe de conservation de l'énergie, soit sur des descriptions statistiques de feux expérimentaux. Leur programmation informatique permet d'obtenir des simulations numériques qui prédisent par exemple l'intensité d'un feu et sa vitesse de propagation en fonction de facteurs environnementaux tels que le type de végétation et la couverture, la topographie du terrain et les conditions climatiques. L'amélioration et la validation de ces modèles nécessitent la comparaison des données numériques qu'ils génèrent avec des données réelles. [4]

Etat de l'art :

Trois grandes approches classiques ainsi que leurs limites pour la modélisation de la propagation des feux de forêts. En effet, on peut citer:

6.1 L'approche purement physique qui n'a jamais abouti à l'implémentation d'un modèle qui prédit la propagation du feu connaissant les paramètres qui expliquent le phénomène. Ceci tient essentiellement aux difficultés à combiner et quantifier les mécanismes physiques et chimiques régissant le comportement global du feu. [4]

6.1.1 Technique de propagation des ondes ou propagation elliptique : en 1982, Anderson *et al.* ont adapté le concept d'Huygens à la propagation des incendies. Si un repère (OXY) est considéré, en supposant un milieu uniforme sur un terrain plat et l'ignition d'un feu au point O, alors le principe de Huygens permet de déduire la forme du front de flammes (fig. 1.3) grâce aux relations suivantes :

$$x_{t, \theta} = t_f \cos \theta + g$$

$$y_{t, \theta} = ht \sin \theta$$

Avec f , g et h des paramètres homogènes à la vitesse et t le temps.

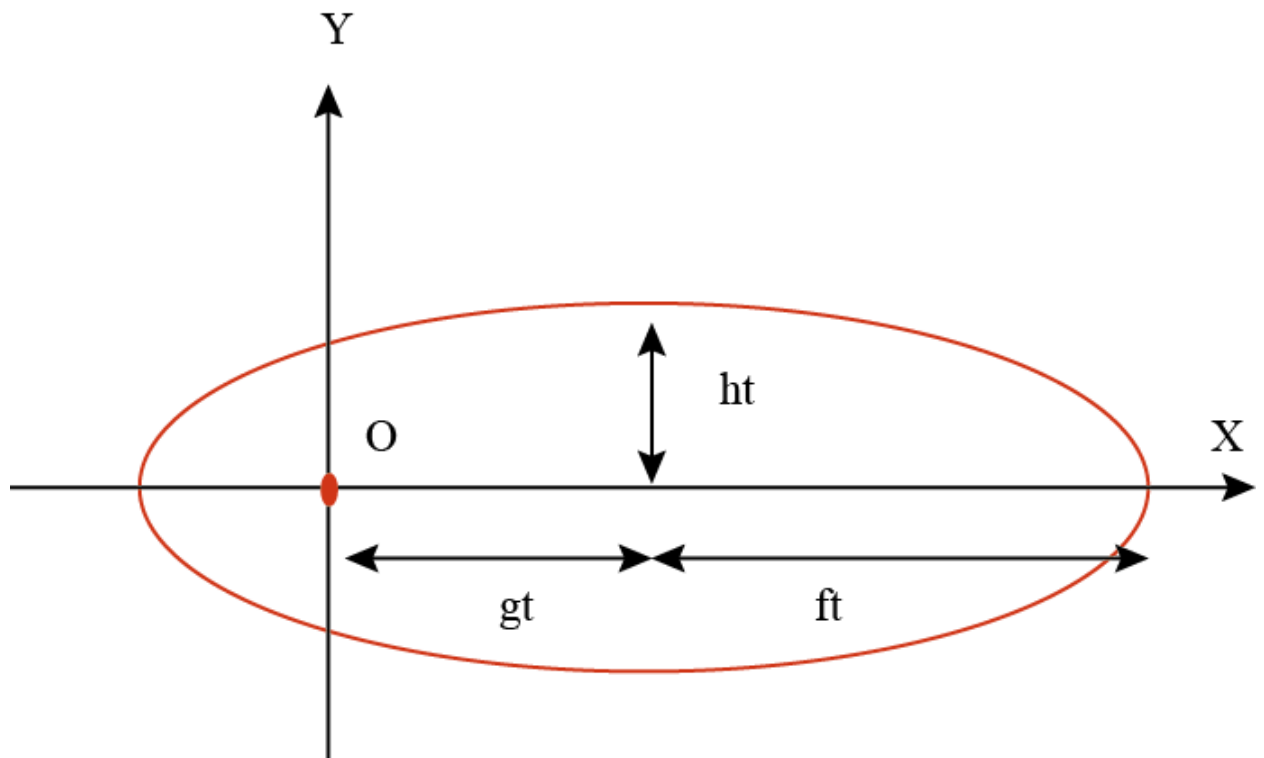


Fig 1.3: Propagation à partir d'un point d'ignition (O)

Van Wagner (1969) a démontré que le contour d'un feu se propageant sur une végétation homogène pouvait être approximé par une simple ellipse. Ainsi, généralement une représentation bidimensionnelle d'un périmètre de feu est considérée comme étant d'une forme elliptique lorsque les facteurs qui affectent le comportement (végétation, vent, topographie, etc.) du feu sont spatialement et temporellement constants. Ces conditions d'uniformité sont rarement rencontrées lors de feux réels. Néanmoins, Richards (1990) réaffirma que lorsqu'un incendie se propageait sur un terrain avec une pente et un vent quasiment constants et une teneur en eau du végétal identique pour l'ensemble de la zone, la forme du périmètre du front de flammes pouvait être considérée comme étant une ellipse mais cet auteur développa également un système d'équations différentielles permettant de décrire la propagation d'un feu, à l'aide de la technique elliptique, lorsque les conditions environnementales ne sont plus uniformes. Pour propager un front de flammes entre un temps t et un temps $t + dt$, tous les points du front de flammes au temps t sont considérés comme des points sources et le front de flammes à $t + dt$ est l'enveloppe de toutes les ellipses (fig 1.4) [4]

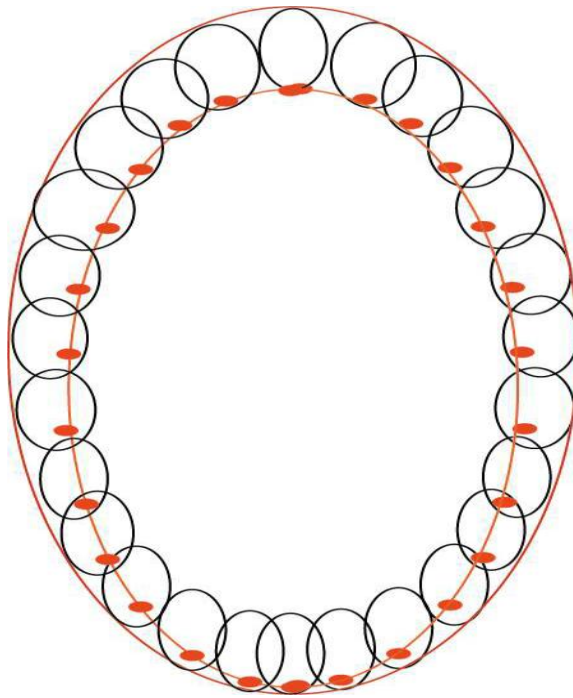


Fig 1.4 : Principe de construction des périmètres de front de flammes avec la méthode Elliptique

Le nombre de points sur un périmètre augmente au fur et à mesure que le feu prend de l'importance. De plus, la forme d'une ellipse, sa direction et ses dimensions sont liées aux conditions environnementales [5], Finney étudia ses différents effets.

Par exemple, la figure 1.5 ci-dessous schématise l'effet qualitatif du vent sur une ellipse :

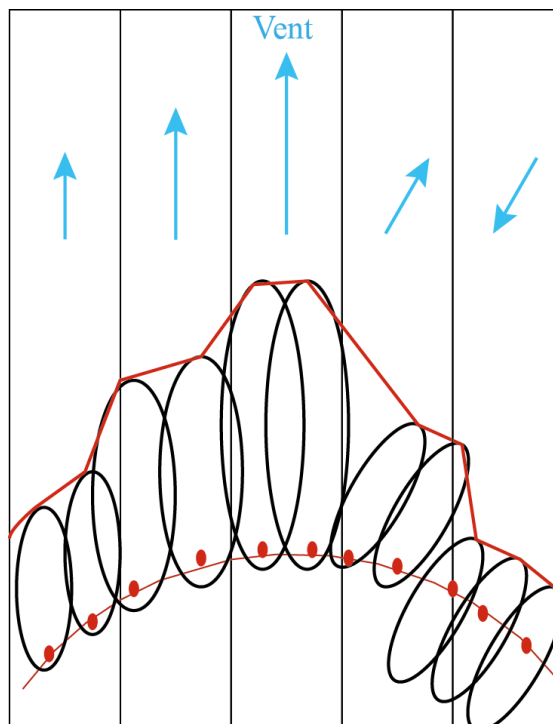


Fig 1.5 : Effet du vent sur la forme d'un front de flammes

Les paramètres géométriques f , g et h ont été reliés à la vitesse au moyen de lois empiriques . Ces lois produisent différentes formes pour une même vitesse du vent. Finney avance met en avant les incertitudes sur la mesure du vent et la structure de la végétation ainsi que les effets de l'irrégularité des terrains pour expliquer ces différences. La difficulté majeure de l'application de ce type de modèle réside dans la détermination de ces paramètres géométriques.

Une méthode alternative consiste à décomposer le front de flammes en segments qui sont propagés individuellement à chaque pas de temps. Chaque segment est défini par un vecteur normal bidimensionnel. Chaque point du périmètre de l'incendie est considéré comme une source théorique de feu et les nouveaux feux sont supposés se déclencher instantanément. L'expansion de l'incendie est déterminée en calculant la vitesse de propagation de tous les segments du contour de flammes et en multipliant ces résultats par le pas de temps fixé au préalable [7]. Il est à noter que d'autres formes géométriques plus complexes ont été proposées lors d'études plus récentes. Le principal avantage de ces approches est le fait qu'elles sont peu gourmandes en temps de calcul. Même si l'évaluation de l'expansion d'un incendie à l'échelle du terrain a fait l'objet de plusieurs études cette technique est toujours en cours de développement.

6.2 L'approche empirique qui repose sur l'observation du feu in situ. Elle nécessite autant d'observations que de conditions possibles de propagation sont diverses. Cette approche est satisfaisante au Canada, caractérisé par des peuplements forestiers uniformes sur de très grandes superficies et par une faible diversité du combustible. La très grande hétérogénéité des conditions de propagation et leur variabilité sur de petits espaces en région méditerranéenne en compromettent énormément l'usage.

6.3 L'approche intermédiaire, qui consiste à proposer des équations de propagation émanant de principes physiques, et à évaluer certains termes expérimentalement et de manière contrôlée. C'est la démarche adoptée par les chercheurs américains, qui a abouti au modèle de « ROTHERMEL » (Rothermel, 1972) utilisé par le système, de prédiction de la propagation, américain « BEHAVE ».

6.4 L'approche réseau, dit « Petit monde » [6] est une autre variante élaborée sur la base des automates cellulaires (AC). Elle est susceptible de constituer un simulateur de feu de forêt.

Une autre approche, complètement différente des précédentes, est purement basée sur le concept des automates Cellulaires (AC) (Fatès, 2006). Elle est utilisée pour modéliser et simuler des phénomènes de diffusion en général, et des incendies de forêts en particulier.

En 1984, les services forestiers américains ont proposé la première version de l'outil

BEHAVE [8]. L'objectif principal de ce simulateur était de prédire l'étendue d'un incendie de surface à l'échelle du terrain et son intensité. Pour cela, les utilisateurs devaient disposer de données concernant la végétation et les conditions environnementales accessibles à la mesure. Ainsi, la vitesse de propagation en chaque point du front de flammes était évaluée grâce à une formulation analytique ne nécessitant que l'intensité de la réaction par unité de temps ($W.m^{-2}.s^{-1}$), la charge volumique du combustible ($kg.m^{-3}$), l'apport de chaleur nécessaire à l'ignition du végétal ($W.kg^{-1}$) ainsi qu'un ratio de propagation et deux coefficients relatifs aux effets de la pente et du vent. Des corrélations empiriques permettaient de déterminer les paramètres impliqués non mesurables.

En 1982, les jeux de paramètres pour treize types de végétations couramment répandus aux Etats-Unis furent déterminés. Par la suite, ce simulateur fut amélioré en proposant une interface plus conviviale et en incluant des modèles supplémentaires, comme ceux décrivant les feux de cimes et les sautes de feux. Depuis, d'autres simulateurs ont également été proposés par des équipes de recherche de par le monde. Tous ces simulateurs sont des outils capables de prédire le comportement d'un incendie en utilisant les données correspondant aux sites étudiés : conditions météorologiques, topographie du terrain, type de végétation. Ils sont généralement composés d'équations mathématiques dont la résolution permet d'obtenir des valeurs numériques des différentes caractéristiques du feu (vitesse de propagation, hauteur ou longueur des flammes, etc.). Selon Perry (1998), ces simulateurs peuvent être divisés en deux catégories : ceux liés à un système de grille et ceux ne nécessitant pas une grille prédéfinie (milieu continu). Ainsi, si la zone où le feu est susceptible de se propager est envisagée comme une grille d'éléments ou cellules, la propagation d'un feu d'un élément à l'autre est liée à des règles spécifiques dites « *d'occurrence* » (fig 1.6). Les principales techniques pour traduire cette propagation se basent sur les théories de la percolation ou des automates cellulaires [4].

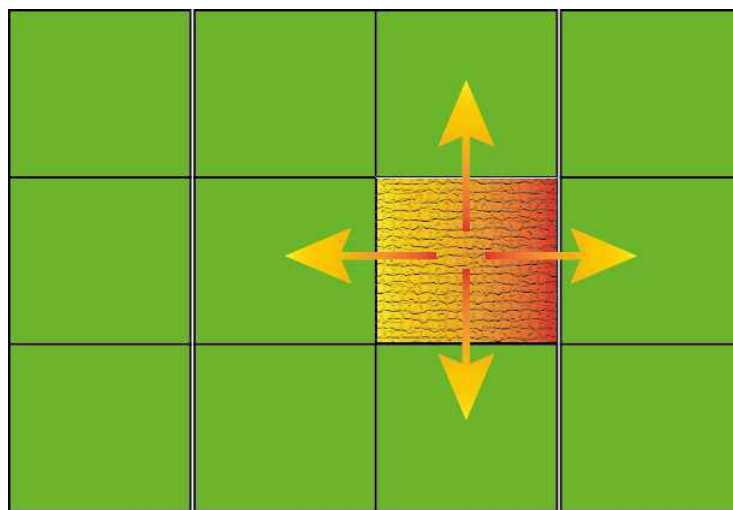


Fig 1.6 : Propagation du feu sur une grille d'éléments

Dans les années 1980, cette approche est devenue pertinente car les progrès technologiques rencontrés dans le domaine informatique et particulièrement dans le calcul parallèle ont réduit considérablement les temps de calcul. Plusieurs outils ont proposé l'intégration de système d'information géographique (SIG) à des simulateurs utilisant les modèles cellulaires. En effet, les modèles de propagation des incendies qui utilisent cette technique sont parfaitement adaptés pour intégrer des données géo spatiales. Les difficultés de cette approche à reproduire correctement le contour du feu lorsque les conditions environnementales deviennent hétérogènes, ont connues des avancées notables ces dernières années. Par exemple, cette méthode ne retranscrit pas de façon satisfaisante les changements temporels de la vitesse du vent et surtout ceux de sa direction. L'autre option qui fait appel à la technique de propagation des ondes, n'a pas ce problème. Par contre, si cette zone est considérée comme un milieu continu, le front de flammes est représenté à l'aide de fonctions mathématiques et la technique de propagation des ondes (ou propagation elliptique).

6.4.1 Technique de percolation :

Pour cette technique, les éléments qui composent la grille représentant la surface sur laquelle se propage le feu peuvent être des carrés, des triangles ou des cellules hexagonales. Le feu se propage d'une cellule qui brûle à une cellule voisine non brûlée selon une probabilité. Cette probabilité doit prendre en compte les facteurs extérieurs tels que la vitesse du vent, la topographie et les différences éventuelles du végétal. Ainsi, cette technique demande des ajustements pour que les feux simulés se comportent de la même manière que des feux réels sur des territoires dont la topographie, les conditions météorologiques et la végétation sont connues. Pour cela, ces probabilités sont ajustées grâce à un modèle mathématique empirique conçu à partir de données provenant de feux réels. [4]

6.4.2 Technique des automates cellulaires :

Les modèles cellulaires sont des outils capables de représenter le comportement d'un système réel complexe. Ils permettent de décrire simplement les comportements de ces derniers. Par définition, un modèle cellulaire est un modèle qui incorpore un ou plusieurs automates cellulaires.

L'application de cette approche à la propagation d'un feu de végétation a été très efficace en terme de temps de simulation grâce à la parallélisations des calculs.

Comme pour la technique de percolation, la zone de propagation est représentée par une grille Composée d'éléments. Chaque cellule contient des informations (type de végétation, pente, etc.). De plus, chaque élément est considéré à un état initial spécifique avant son ignition.

La probabilité de propagation d'une cellule à une autre est déterminée par des règles communes à tous les éléments. Ces règles établissent un rapport entre l'état futur d'une cellule,

son état initial et les états de ses cellules voisines. Elles peuvent être conçues au moyen de modèles de comportement des feux physiques, semi physiques ou même empiriques. Lorsque ces règles sont conçues à partir de modèles physiques, cette technique est censée pouvoir être appliquée pour différentes conditions météorologiques [9].

7. Les principaux simulateurs

Ces dernières années, les progrès technologiques ont permis aux ordinateurs d'effectuer des calculs de plus en plus rapides, de stocker de plus en plus de données et d'offrir des interfaces graphiques réalistes. Ceci a débouché sur le développement de plusieurs simulateurs capables de prédire le comportement d'un incendie à l'échelle du terrain . Ces produits diffèrent par le type de modèle de propagation utilisé, par la technique de propagation sélectionnée et par l'usage envisagé. Il est à noter que la plupart de ces simulateurs, tel que FARSITE (Finney, 1998), sont basés sur le modèle de Rothermel [8]. Néanmoins, il n'est pas aisé de sélectionner un modèle ou un simulateur existant afin qu'il soit utilisé à l'échelle du terrain par les opérationnels en Méditerranée. En effet, plusieurs facteurs doivent être analysés dans le but de comparer les capacités de ces simulateurs à prédire un feu réel dans des conditions climatiques extrêmes que peuvent connaître ces régions Méditerranéennes : temps de calcul en temps réel ou non, échelle spatiale de simulation, précision demandée des entrants, etc. Le tableau 0.1 est une synthèse de ces caractéristiques pour 17 des principaux simulateurs développés dans le monde.

Tableau 0.1 : Les principaux simulateurs (adapté de Pastor *et al.*, 2003)*SFM = feux de surface ; CFIM = modèle d'ignition des feux de cimes; CFSM = modèle de propagation des feux de cimes ; SM = modèle de sautes de feux

<i>Nom</i>	<i>Pays</i>	<i>Principales caractéristiques</i>		<i>Utilisation opérationnelle</i>	<i>Testé en Méditerranée</i>
BEHAVE	États-Unis	SFM Rothermel		Feux dirigés ; lutte ; aménagement du territoire	oui
CARDIN	Espagne	SFM Rothermel	Automate cellulaire	Feux dirigés	oui
DYNAFIRE	États-Unis	SFM Rothermel	Automate cellulaire	Simulation des feux de surface allant des intensités faibles à modérées	
EMBYR	États-Unis	SFM Hargrove et al.	SM Automate cellulaire	Simulation des aires brulées à l'échelle du terrain	
FARSITE	États-Unis	SFM Rothermel	SM Technique de propagation des ondes ; CFSM	Feux dirigés ; lutte ; aménagement du territoire	oui
FIREGIS	Portugal	SFM Rothermel	Automate cellulaire	Entraînement	oui
FIREMAP	États-Unis	SFM Rothermel	Automate cellulaire	Simulation des feux de surface allant des intensités faibles à modérées	
FIRESTATION	Portugal	SFM Rothermel	Automate cellulaire	Feux dirigés ; lutte ; aménagement du territoire	oui
FIRESTAR	France			Recherche	oui
FOOREFIRE	France (Corte)	SFM	Technique de propagation des ondes	Recherche	oui
GEOFOGO	Portugal	SFM Rothermel	Automate cellulaire	Recherche	oui
MEFISTO- AIOLOS-F	Grèce	SFM	Automate cellulaire		
NEXUS	États-Unis	SFM Rothermel; CFSM Rothermel			
PROMETHEUS	Canada	SFM	CFSM Technique de propagation des ondes	Feux dirigés	
SIROFIRE	Australie	SFM	Technique de propagation des ondes	Feux dirigés	
WILDFIRE	Canada	SFM	CFSM	Simulation des feux de surface allant des intensités faibles à modérées	

8. Conclusion

Dans ce chapitre on a illustré quelque définition de feu de forêt et se types ainsi que des approches de modélisations.

Chapitre 2

Les automates cellulaires

*« Comment des objets simples interagissant selon des règles simples, peuvent-ils engendrer des comportements complexes ? » **Stephene Wolfram***

Plan détaillé du chapitre

1. Introduction	30
2. Les AC dans la littérature	30
2.1 Définition	32
2.2 Exemple.....	33
2.3 Caractéristiques et propriétés.....	34
2.3.1 Caractéristiques techniques	34
2.3.2 Caractéristiques fonctionnelles.....	37
2.3.3 Propriétés.....	38
3. Le jeu de la vie.....	41
4. Automates cellulaires élémentaires.....	43
5. Classification de WOLFRAME.....	47
6. Domaines d'application.....	49
7. Conclusion.....	51

1. Introduction :

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.

Les automates cellulaires permettent une modélisation classique simple des systèmes complexes loin de la complexité des modèles mathématiques comme les équations différentielles et dérivé partielles. Ce chapitre présente un aperçu sur les définitions, propriétés, caractéristiques des automates cellulaires ainsi que exemples des domaines d'utilisations. [9]

2. Les AC dans la littérature

Les automates cellulaires sont des systèmes dynamiques discrets dans le temps et l'espace dont le nombre de configurations possibles est fini, leur fonctionnement se base sur des règles d'interaction locale simples. Ces règles locales simples peuvent donner lieu à des phénomènes complexes à l'échelle globale. Le concept d'automate cellulaire date de la fin des années 1940, les motivations originelles étaient très ambitieuses et sont encore pleinement d'actualité aujourd'hui. [10]

Le pionnier dans ce domaine est sans conteste John von Neumann, lequel participa à l'élaboration des premiers ordinateurs. Son modèle d'automate cellulaire constitue le premier exemple d'une application massivement parallèle.

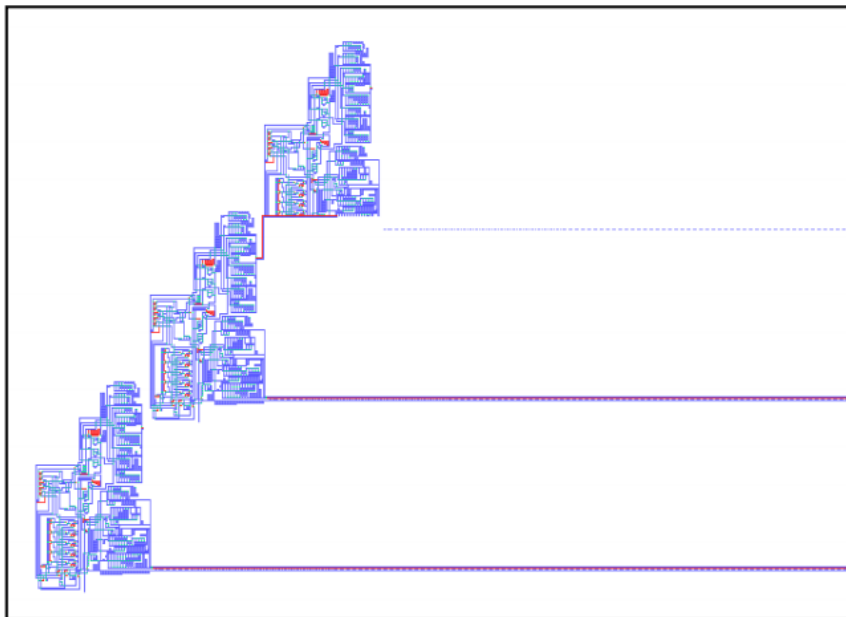


Fig 2.1 Capture d'écran de l'implémentation de la machine universelle

Suivant les suggestions de Stanislaw Ulam, von Neumann se place dans le contexte d'un univers totalement discret constitué de cellules. Chaque cellule est caractérisée par un état interne,

typiquement un nombre fini de bits. Ce système de cellules évolue à des pas de temps discrets. Chaque cellule du système suit la même règle d'évolution, laquelle est fonction de l'état des cellules du voisinage. La mise à jour de l'état des cellules se fait en parallèle de manière synchrone. Ces systèmes dynamiques complètement discrets inventés par von Neumann porte le nom d'automates cellulaires.

Le premier automate cellulaire auto-répliquant, proposé par von Neumann, était composé de plusieurs milliers de cellules disposées sur un réseau bidimensionnel carré, chaque cellule pouvant se trouver dans un parmi 29 états. Etant donné sa complexité, cet automate n'a été que partiellement implémenté sur un ordinateur et cela en 1995 seulement. Par machine auto-répliquante, on entend une "machine" capable de générer de nouvelles machines avec les mêmes capacités et de complexité identique. La règle de l'automate cellulaire de von Neumann possède une propriété d'universalité: il existe une configuration initiale de l'automate cellulaire qui peut, en itérant la règle, aboutir à la solution de n'importe quel algorithme. Cela signifie en fait que n'importe quel circuit logique peut être simulé à l'aide de cette règle.

En 1970, le mathématicien John Conway invente son célèbre *jeu de la vie*. Sa motivation est d'exhiber une règle simple engendrant un comportement complexe. Le jeu de la vie est fascinant parce que l'évolution du système est imprévisible. Certains motifs meurent complètement, d'autres plus nombreux évoluent vers des configurations stables ou cycliques. Le jeu de la vie est un automate cellulaire qui possède la même propriété d'universalité que celui de von Neumann.

A la fin des années 1980, il y a eu un regain d'intérêt pour les automates cellulaires avec la montée en puissance des ordinateurs. Récemment, un domaine voisin des automates cellulaires a connu une forte expansion: les systèmes multi-agents. Cependant, il faut relever que les automates cellulaires étaient déjà utilisés dans les années 1950 pour le traitement d'images (les cellules correspondent dans ce cas aux pixels). Des machines dédiées, basées sur des automates cellulaires, furent construites pour le débruitage, le dénombrement et l'estimation de tailles dans des images issues d'observations au microscope.

Les automates cellulaires peuvent être vus comme un équivalent discret des équations aux dérivées partielles, lesquelles décrivent des systèmes dynamiques continus. L'idée sous-jacente est de décrire un système complexe à un niveau microscopique en simulant directement les interactions entre les cellules avec des règles simples, plutôt que d'utiliser des équations compliquées. En d'autres termes, on ne décrit pas un système complexe à l'aide d'équations compliquées, mais on laisse plutôt la complexité émerger des interactions simples entre individus.

Les automates cellulaires définissent un nouveau cadre de travail ainsi qu'un outil de simulation. Ils renferment certains aspects importants des lois de la physique telles que la

simultanéité des déplacements, la localité des interactions et la réversibilité temporelle. La règle d'un automate cellulaire est en quelque sorte une description microscopique de la réalité. Une règle adéquate génère un comportement réaliste au niveau macroscopique. Ainsi, les automates cellulaires permettent de modéliser la dynamique des fluides en reproduisant, dans une certaine limite, les équations de Navier-Stokes. On peut par exemple simuler des écoulements de fluides en milieu poreux, des phénomènes de micro-émulsion, d'érosion ou de transport. D'autres phénomènes physiques comme des processus de réaction-diffusion, de cristallisation ou de propagation d'ondes sont assez bien décrits à l'aide d'automates cellulaires.

2.1

Définition 1 (Automate cellulaire) *Un automate cellulaire $\mathcal{A} = (d, \mathbb{S}, \mathcal{V}, \delta)$ est la donnée de :*

1. Sa dimension $d \in \mathbb{N}^*$, qui est la dimension de son réseau \mathbb{Z}^d
2. Un ensemble fini d'états \mathbb{S} , appelé alphabet
3. Son voisinage $\mathcal{V} = (v_1, v_2, \dots, v_n) \in (\mathbb{Z}^d)^n$
4. Sa règle locale de transition $\delta : \mathbb{S}^n \longrightarrow \mathbb{S}$

Une *configuration* de l'automate \mathcal{A} est une application de \mathbb{Z}^d dans \mathbb{S} : on associe à chaque cellule de l'automate un état. On note \mathfrak{C} l'ensemble des configurations de \mathcal{A} .

Un automate cellulaire peut être considéré comme un système dynamique à temps et espace discrets en munissant \mathfrak{C} de la fonction globale de transition de l'automate \mathcal{A} , c'est-à-dire la fonction d'évolution temporelle de la configuration. Cette fonction $\mathfrak{F} : \mathfrak{C} \longrightarrow \mathfrak{C}$ est définie cellule par cellule par :

$$\forall \mathbf{c} \in \mathfrak{C}, \forall \gamma \in \mathbb{Z}^d, \mathfrak{F}(\mathbf{c})(\gamma) = \delta(\mathbf{c}(\gamma + v_1), \dots, \mathbf{c}(\gamma + v_n))$$

L'automate cellulaire décrit alors le système dynamique

$$\begin{cases} \mathbf{c}_0 \in \mathfrak{C} \\ \forall n \in \mathbb{N}, \mathbf{c}_{n+1} = \mathfrak{F}(\mathbf{c}_n) \end{cases}$$

- Définition 2 (Automate cellulaire)

D'un point de vue formel [11], 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 (contiguïté 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 $E_i^{t+1} = f(E_i^t; E_{V_i}^t)$

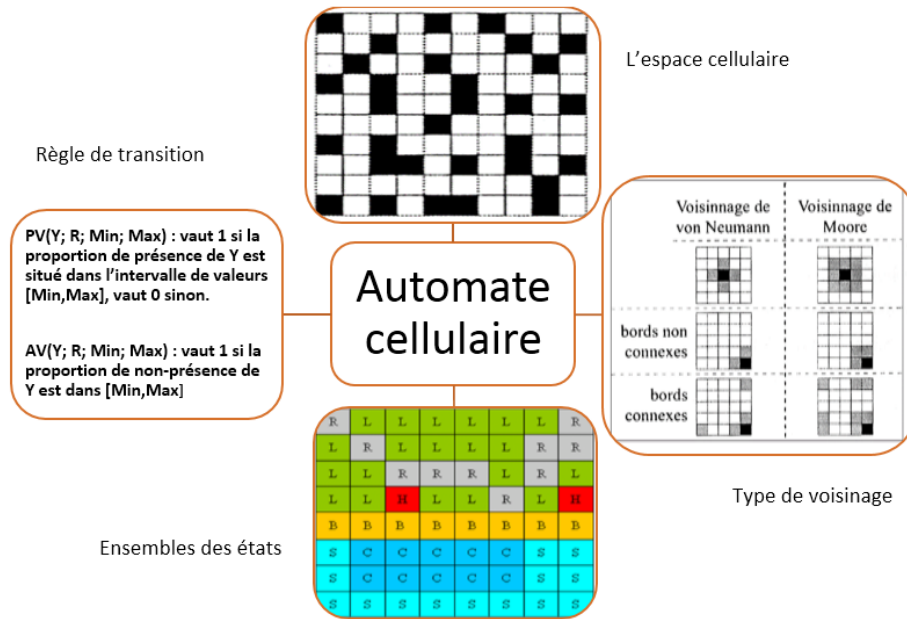


Fig 2.2 : Composants d'un automate cellulaire

2.2 Exemple de simulation d'un automates cellulaires



Fig 2.3: Exemples de diagrammes espace-temps d'automates cellulaires ayant tous le même réseau $R = \mathbb{Z}$, les mêmes vecteurs de voisinage $\{-1, 0, 1\}$ et le même alphabet

2.3 Caractéristiques techniques d'un automate cellulaire

- 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.

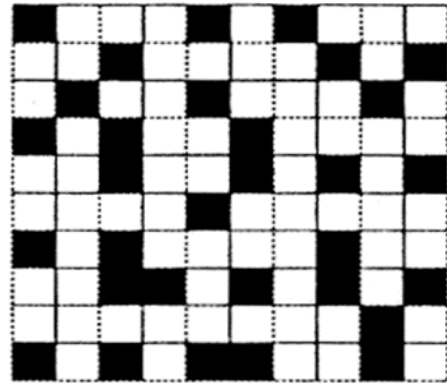


Fig 2.4 : espace 2D d'automates cellulaires

- 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.

- 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.

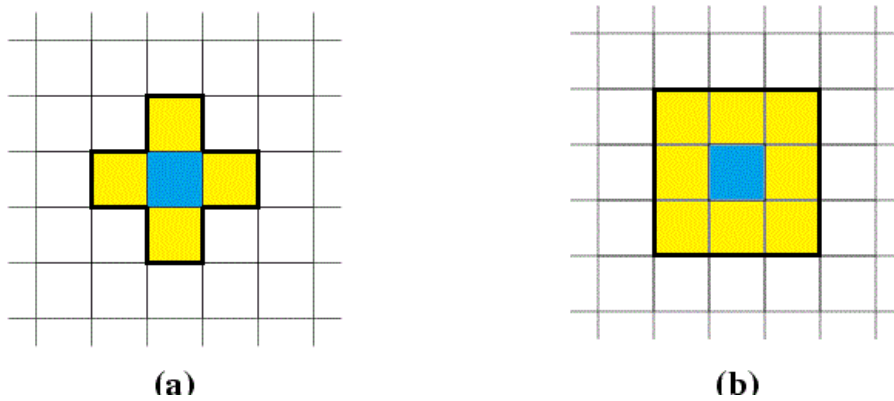


Fig 2.5: voisinage de Von Neuman et de Moore

- 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.

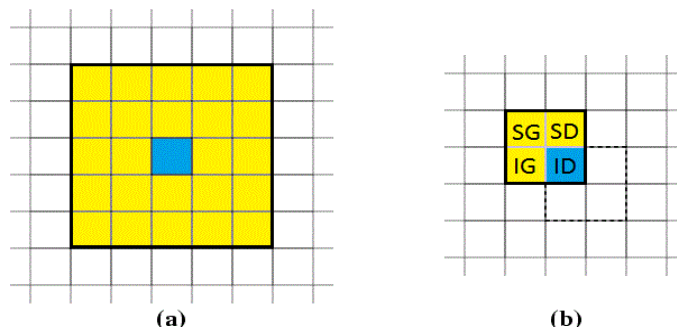


Fig 2.6: voisinage de Moore étendu et de Margolus

- 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.

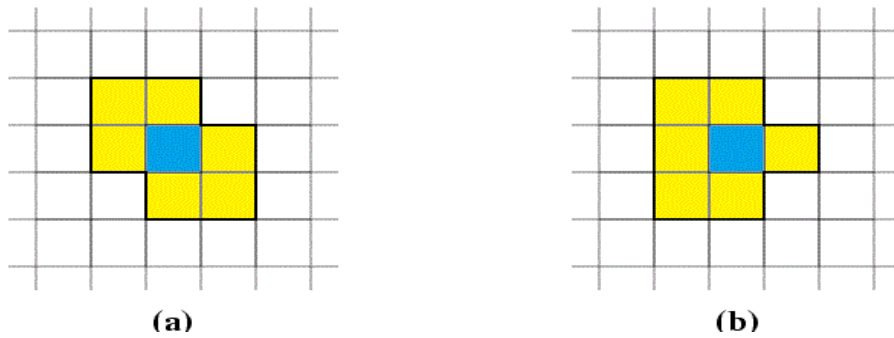


Fig 2.7: variation de voisinage de Von Neuman

- 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):

1. **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.
2. **Fixes:** Le voisinage est complété avec des cellules dont l'état est fixe.
3. **Adiabatiques:** Le voisinage est complété en dupliquant la cellule.
4. **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.

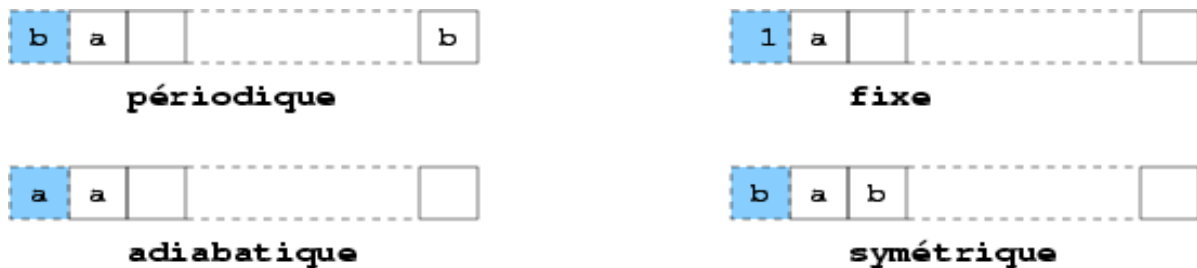


Fig 2.8 : voisinage des cellules de bord

- 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	$> 10^{38}$	$> 10^{87}$
4 voisins	65 536	$> 10^{38}$	$> 10^{154}$	$> 10^{436}$
5 voisins	4 294 967 296	$> 10^{115}$	$> 10^{616}$	$> 10^{2184}$
6 voisins	$> 10^{19}$	$> 10^{347}$	$> 10^{2466}$	$> 10^{10921}$

Tab 2.1 nombre de règles possibles selon nombre de voisin et nombre d'états

2.3 Caractéristiques et propriétés

2.3.1 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:

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.

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.

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.

4) L'homogénéité:

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

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.

2.3.2 propriétés d'un automate cellulaire

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 aucunement 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.

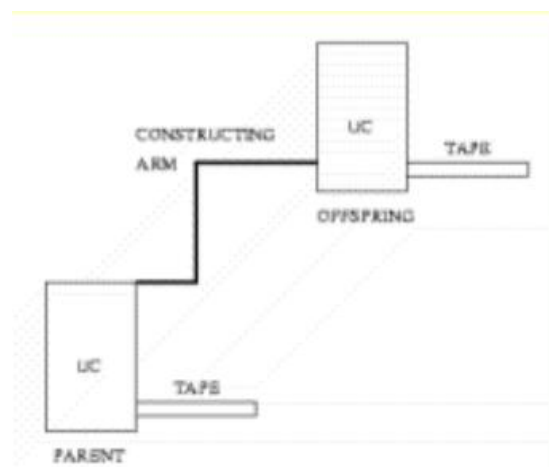


Fig 2.9 : Machine de Turing de Von Neumann

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 ont 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 10 cellules 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.

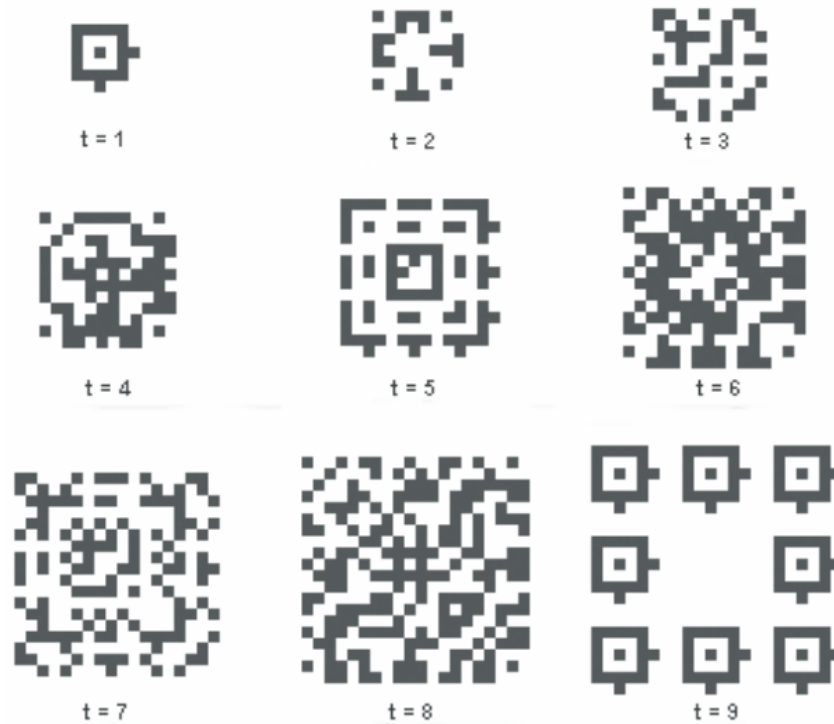


Fig 2.10 : propriété de reproduction

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

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.

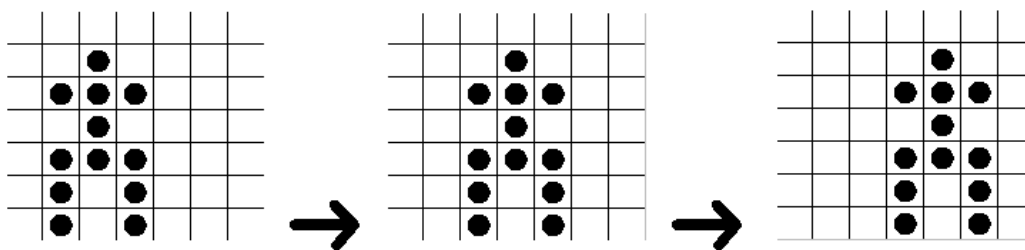


Fig 2.11 : l'automate déplacement Est

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.

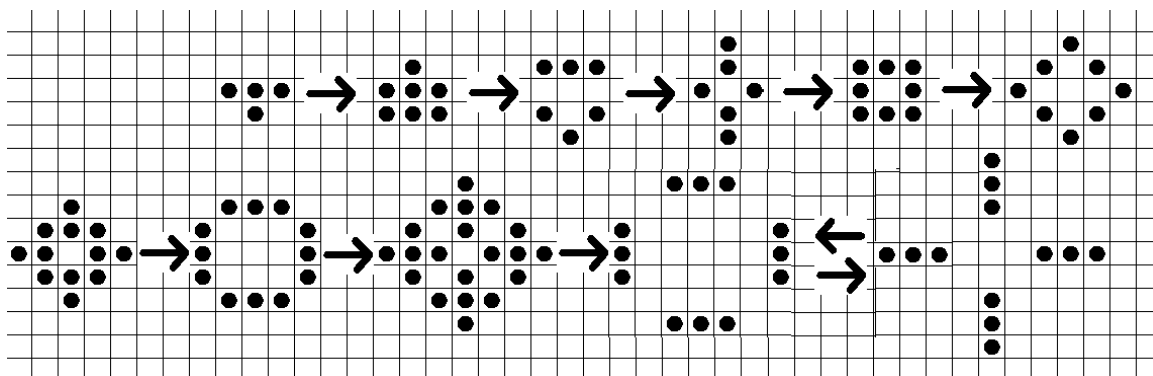


Fig 2.12 : automate de type jeu de la vie

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.

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.

5. Emergence

Exprime l'apparition des propriétés nouvelles qui apparaissent du fait de l'agrégation d'élément au sein d'un ensemble, en opposition total avec les théories

3. Le "jeu de la vie" de Conway

Le jeu de la vie est basé sur un automate cellulaire très simple dont la diversité des comportements dynamiques en fonction des configurations initiales est étonnante. Cette dynamique très riche en a fait une vedette des récréations mathématiques et des programmes élémentaires d'initiation à l'informatique. Les motivations de son auteur, Conway, rappellent un peu celles de von Neumann d'exhiber une règle simple engendrant un comportement complexe. Mais le modèle de l'automate autoreproducteur de von Neumann à était de fort complexité: c'est un automate à 29 états, et la configuration constructrice comprend 200 000 automates à l'état non quiescent. Par contre, celui de Conway est beaucoup plus simple. Le voisinage est celui de Moore (neuf entrées). Comme son nom l'indique, cet automate cellulaire présente un côté "écologique". En effet, les cellules naissent, vivent ou meurent selon la densité locale de la population. Le jeu de la vie prend place sur un réseau bidimensionnel carré dont l'état d'une cellule est stockée sur un bit. Le jeu de la vie est fascinant parce que l'évolution du système est imprévisible. Certains motifs meurent complètement, d'autres plus nombreux évoluent vers des configurations stables ou cycliques. Le jeu de la vie est un automate cellulaire qui possède la même propriété d'universalité que celui de von Neumann. Voici les règles de transition:

3.1- Survie

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



Fig 2.13 règle de survie dans jeu de la vie

3.2- 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.

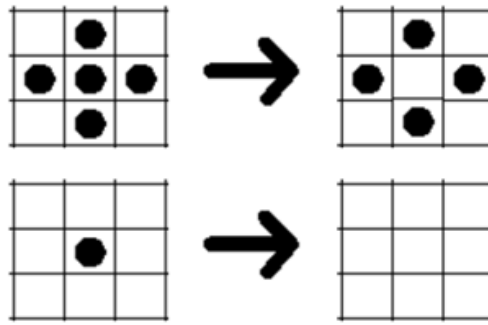


Fig 2.14 règle de mort dans jeu de la vie

3.3- Naissance

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



Fig 2.15 : règle de naissance dans jeu de la vie

La figure 2.16 montre l'évolution d'une exécution du jeu de la vie sur une configuration torique 50 x 50

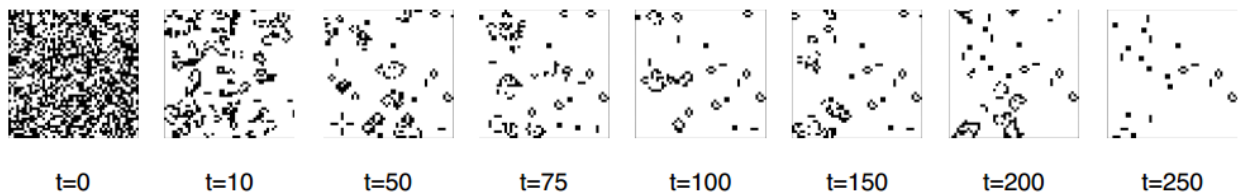


Fig 2.16 : exemple de jeu de la vie

La figure 2.17 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.

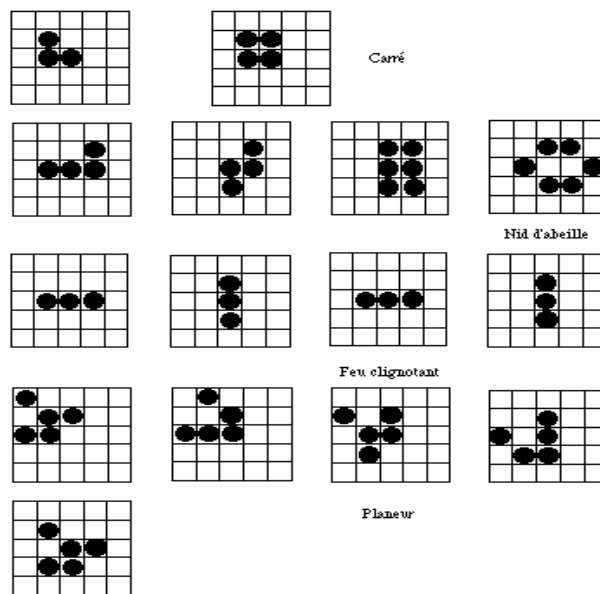


Fig 2.17 : exemple de jeu de la vie

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.

4. Les automates cellulaires élémentaires

L'automate cellulaire 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. Pour réaliser cette automate cellulaire élémentaire, nous allons considérer des cases disposées en ligne. Chaque case peut être soit blanche, soit noire. Au démarrage simulation, nous allons supposer qu'une seule case est noire, comme sur le schéma ci-dessous.



Puis nous allons faire évoluer notre système, en définissant des règles qui vont conditionner comment la couleur des cases change à chaque étape de la simulation. Pour faire au plus simple, nous allons supposer que **la nouvelle couleur d'une case dépend de sa couleur actuelle et de celle de ses voisins**. Voici une règle de ce genre :

- si une case est noire, elle reste noire.
- si elle est blanche, elle devient noire si elle possède au moins une voisine noire.

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.

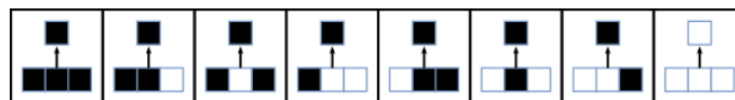
Les automates de cette famille sont dits « élémentaires ». On les désigne souvent par un entier entre 0 et 255 dont la représentation binaire est la suite des états pris par l'automate sur les motifs successifs 111, 110, 101, 100, etc.

À titre d'exemple, considérons l'automate cellulaire défini par la table suivante et le schéma ci-dessus, qui donne la règle d'évolution :

Motif initial (t)	111	110	101	100	011	010	001	000
Valeur suivante de la cellule centrale ($t+1$)	1	1	1	1	1	1	1	0

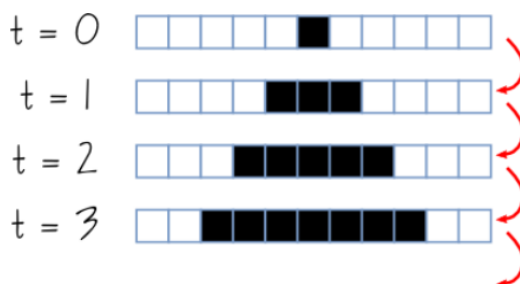
Cela signifie que si par exemple, à un temps t donné, une cellule est à l'état « 1 », sa voisine de gauche à l'état « 1 » et sa voisine de droite à l'état « 0 » (2 colonne du tableau), au temps $t+1$ elle sera à l'état « 1 ».

On peut facilement représenter cette règle graphiquement, car il n'existe que 8 cas à considérer :



Par convention cette règle est nommée « règle 254 », car 254 en décimale s'écrit 11111110 en binaire .

Si on applique cette règle à notre situation de départ avec une seule case noire, voici ce que l'on obtient à chaque pas de temps :



Pour représenter l'évolution d'un automate cellulaire élémentaire, on peut le simuler sur plusieurs centaines d'itérations, et superposer les différentes lignes obtenues. Dans le cas ci-dessous, on obtient un dessin comme celui ci-dessous.



Fig 2.18 : évolution de la règle 254

Si on modifie un peu les règles qui régissent notre automate et voyons ce qui se passe. Dans la nouvelle règle, si une case noire est entourée par deux cases blanches, elle devient blanche. Dans ce cas j'obtiens la règle dite "numéro 250", qui est représentée ci-dessous à gauche (j'ai souligné en rouge le changement). Le dessin de son évolution est assez semblable au précédent, c'est un triangle, mais cette fois j'obtiens à l'intérieur une sorte de damier. Je peux également faire une autre modification simple de la règle précédente (voir ci-dessous à droite) et obtenir **un autre type de structure périodique**, avec des bandes blanches et noires alternées (il s'agit de la règle 50).

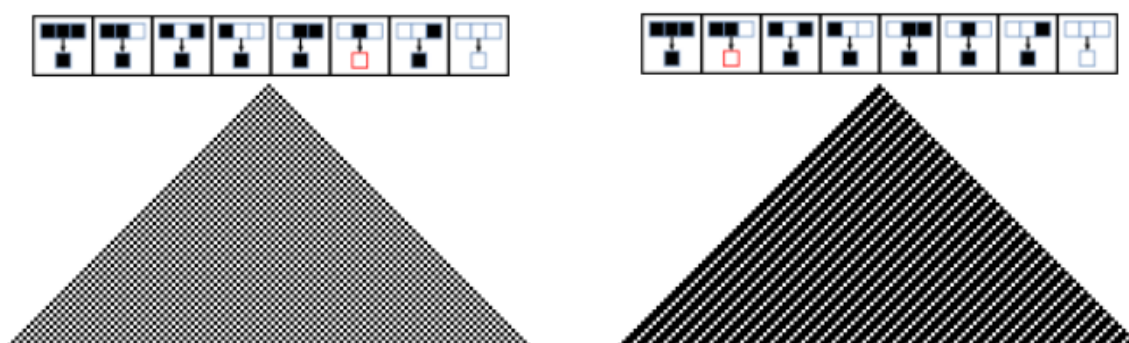


Fig 2.19 : évolution des règle 250 et la règle 50

Encore une fois, rien de bien excitant. Je pars d'une situation simple qui est une unique case noire. J'applique des règles simples de transformation, les mêmes pour toutes les cellules. Et j'obtiens un dessin très régulier. Normal, non ?

Maintenant considérons une nouvelle règle. Elle est quasiment identique à la première que nous avons considérée, avec une seule différence : si une case noire est entourée par deux cases également noires, elle devient blanche au tour suivant. Cette règle est appelée règle 126, et voici ce qu'elle donne :

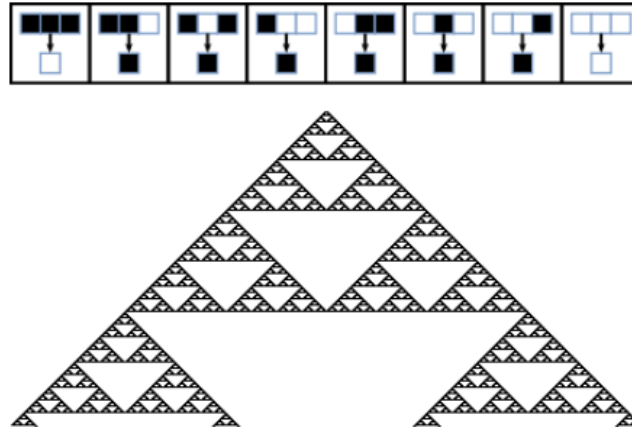


Fig 2.20 : évolution de la règle 126

Bizarre, non ? On reconnaît **une structure fractale connue sous le nom de triangle de Sierpinski**. Voilà qui est bien différent de nos structures régulières précédentes ! N'est-ce pas fascinant que des règles locales élémentaires aussi simples puissent engendrer une organisation globale aussi complexe que cette figure ? Mais ça n'est pas tout.

Parmi les règles considérées par Stephen Wolfram, l'une possède une évolution tout-à-fait étonnante : il s'agit de **la règle numéro 30**. Elle est représentée ci-dessous :

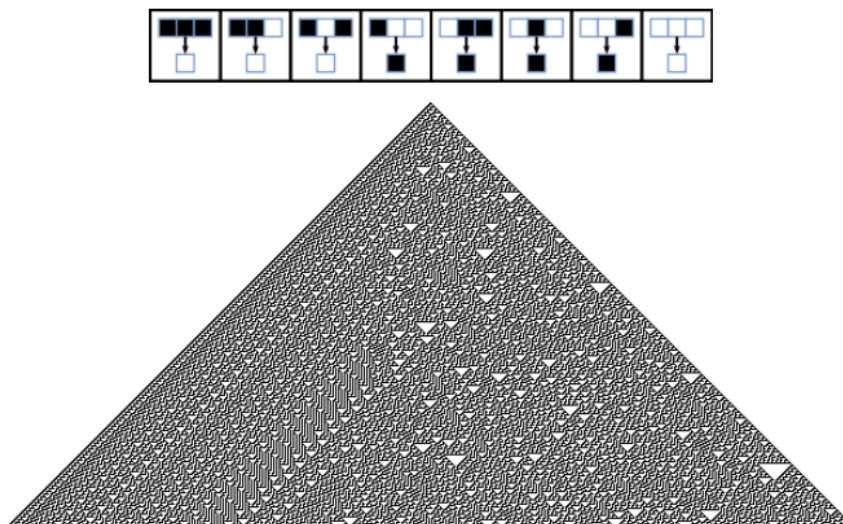


Fig 2.21 : évolution de la règle 30

Si on regarde seulement le début de l'évolution, on a l'impression que cet automate dessine des structures régulières. C'est également le cas sur la partie gauche du dessin. Mais sur la partie droite, des structures en triangle de différentes tailles apparaissent et disparaissent sans logique

apparente. En fait, Wolfram a montré que cet automate avait un comportement totalement désordonné et même chaotique. Son évolution semble totalement aléatoire, et pourtant encore une fois il est défini par des règles simples et une situation de départ simple. Encore une surprise des automates cellulaires élémentaires : des règles simples et déterministes peuvent engendrer le chaos !

5. Classification de WOLFRAM des automates cellulaires

Le nombre d'univers possibles est virtuellement infini. Dans ce contexte, Stephen Wolfram s'est intéressé aux automates à une dimension, deux états avec un voisinage de deux. Il considère que ne sont « légaux » que les automates qui d'une part élimine toute cellule dont le voisinage est vide, et d'autre part sont symétriques. Il n'existe alors que 32 automates légaux dont l'auteur a réalisé une étude systématique.

Wolfram a proposé une classification heuristique des automates cellulaires basées sur des observations de comportements typiques. Cette classification comprend quatre classes: évolution conduit à des configurations triviales, à des configurations périodiques, l'évolution est chaotique, l'évolution conduit à compliqué, [12].

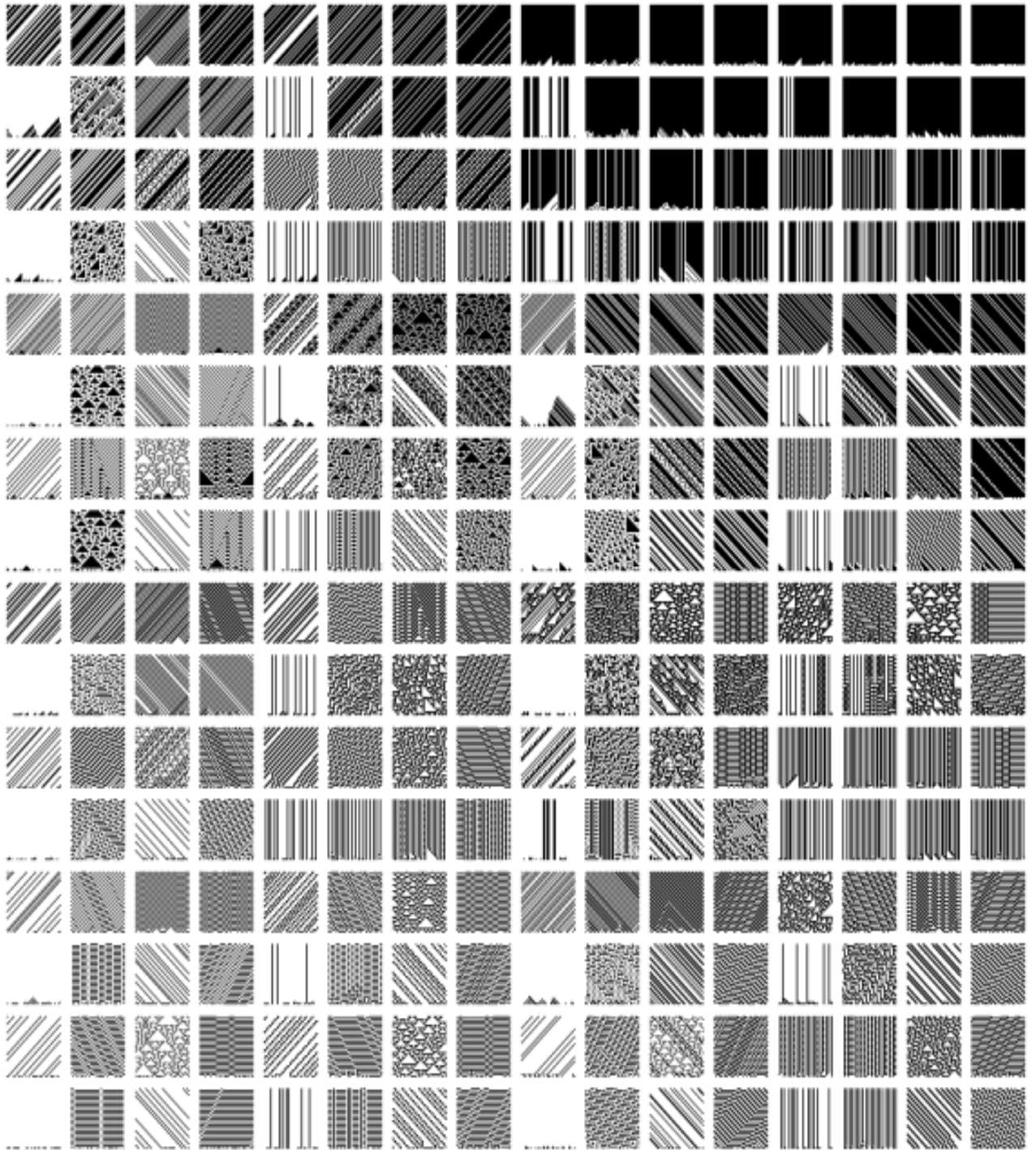


Fig 2.22 : les 256 automates de Wolfram

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.

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 une 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.

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.

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. [13]

6. Domaines d'applications

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 :

– **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.

– **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)

– **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.

– **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.

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.



Fig 2.23 : Exemple de codage d'un message par un automate cellulaire. Cette photo est tirée du numéro 169 de *Pour la Science* (Novembre 1991)

Sans doute la découverte la plus essentielle sur les automates est-elle celle de James Conway. Il a démontré qu'il est possible d'associer des automates pour fabriquer une machine de Turing. Cela acquis, on peut intégralement fabriquer un ordinateur à partir de tels automates. Un des challenges

est alors de disposer un nombre suffisant de semi-conducteurs sur une seule puce. Une dernière application concerne le calcul massivement parallèle : on fait fonctionner un certain nombre d'automates en parallèle, l'intérêt étant une communication aisée entre voisins.

On trouve une littérature abondante qui discute des automates cellulaires et de leurs applications pour les simulations de systèmes complexes. La présence et la thématique commune, de tous ces ouvrages nous convainc de l'existence actuelle d'un paradigme : les automates cellulaires sont aptes à modéliser la réalité et les processus dits "complexes", en particulier ils sont utiles pour modéliser l'ensemble des systèmes où la distribution de l'état local du système n'est pas facilement descriptible algébriquement.

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 3

Modélisation de géographie par automates cellulaires

Plan détaillé du chapitre

1. Introduction	53
2. État de l'art : automates cellulaires et simulation géographique	53
3. Conclusion.....	56

1. Introduction :

Les automates cellulaires conviennent bien à cette « modélisation incrémentale », qui permet par des simulations successives de constituer ce « laboratoire virtuel » ce modèle est indispensable pour la recherche en sciences humaines et sociales, pour lesquelles c'est la seule voie d'expérimentation ».

Le modèle repose sur des règles de transitions spatiales simples, formulées à partir de nos connaissances empiriques mais néanmoins explicatives de la dynamique spatiale car résultant de la pratique sociale.

Ce modèle, de type automate cellulaire, est construit sur un paradigme de la concurrence spatiale entre diverses sous-populations cellulaires en interaction avec leur environnement. Chaque individu cellulaire utilise sa force vitale qui varie de sa naissance à sa mort pour résister aux forces environnementales résultant des individus voisins agissant dans des auréoles de différentes largeurs autour de lui.

L'utilisation d'un automate cellulaire pour simuler le feu de forêt nous semble particulièrement indiquée pour constituer ce « laboratoire virtuel » permettant de tester certaines hypothèses explicatives de l'évolution de feu.

2. État de l'art : automates cellulaires et simulation géographique

La représentation de l'espace par des cellules fut employée dans les modèles d'utilisation du sol. 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. [14]

L'idée d'une Géographie Cellulaire, basée sur l'influence de chaque unité spatiale de terrain sur ses voisins immédiats.

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) [15], 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 :

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.

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.

H. Couclelis (1997)[16] 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 Géo-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. 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 [16] 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 : $V_i = \{U_j, U_k, \dots, U_m\}$.
- 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 :

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* » [17].

Afin de prendre en compte d'autres relations spatiales entre unités, D. O'Sullivan proposa l'utilisation d'automates cellulaires à base de graphes (2001). 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.

3. Conclusion

Les automates cellulaires, sont des modèles très simple à décrire et construit sur un paradigme de la concurrence spatiale entre diverses sous-populations cellulaires en interaction avec leur environnement. L'utilisation de ce modèle pour la simulation géographique et les SIG (système d'information géographique) est indispensable pour la recherche en sciences humaines et sociales, pour lesquelles c'est la seule voie d'expérimentation.

Chapitre 04

Réalisation et tests

Plan détaillé du chapitre

1. Introduction	58
2. Principes d'utilisation	58
3. Description de logicielle	58
3.1. Le menu "File"	59
3.2. Le menu "Configuration"	59
3.3. Le menu "Simulation"	60
3.4. Initialisation automatique de maille	60
3.5. Le menu "AC1D"	61
3.6. Le menu "Help"	62
4. La synchronisation des transitions	62
5. Choix d'un type de configuration initiale	62
6. Terminologies	62
7. Principes de fonctionnement	63
8. Transformation des cellules : les transitions	64
9. Forces d'interaction	64
9.1. Calcul d'une force de transition	65
9.2. Mécanisme de transition	65
10. Syntaxe des règles de la base de connaissance de l'automate Cellulaire	65

1.Introduction :

Dans ce chapitre on va discuter le logiciel développé sous netbeans avec langage Java, cette 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). La configuration initiale de l'automate peut être saisie directement, automatique par un ensemble des.

2. Principes d'utilisation :

Le modèle qui définit la dynamique de l'automate n'est pas préprogrammé, c'est l'utilisateur qui le définit entièrement par les règles de transition et le mode de vie des cellules.

Les règles sont saisies par l'utilisateur dans une fenêtre ou chargées depuis un fichier XML. Les cellules sont carrées. Leur nombre n'est limité que par la mémoire de l'ordinateur (et le temps de calcul).

L'état de chaque cellule est discret, qualitatif. Le temps est aussi discret. Par contre il existe un grand nombre de possibilités de gérer les voisinages. Ils peuvent être 4cellules voisins (voisinage de Von Neumann),8 cellules (voisinage de Moore), ou circulaire avec un Royan R. Le feu peut être démarré au hasard ou manuellement en cliquant sur n'importe quelle cellule.

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.

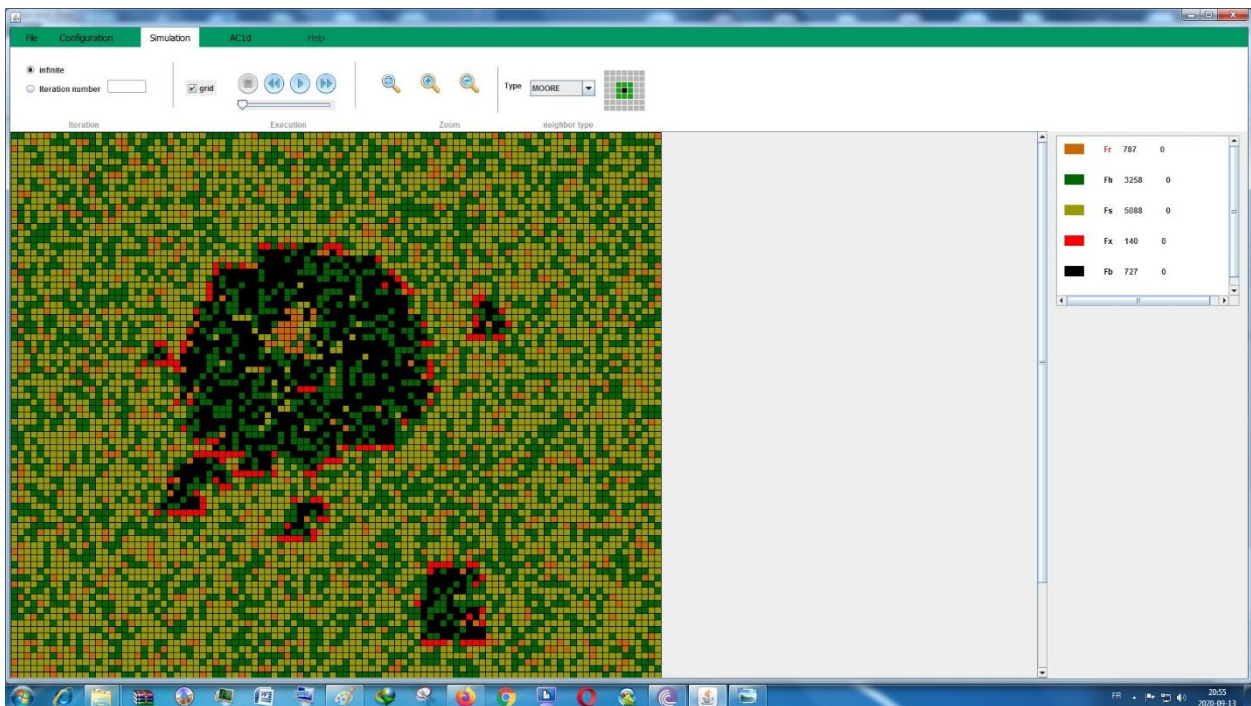


Fig 4.1 interface principale de logicielle

3.1. Le menu "File"

Les fonctionnalités de cette menu sont :

6. Création d'une nouveau exemple (saisie l'ensembles des états, des règles de vie et règles de transitions)
7. Sauvegardé un scénario de simulation (image de système) sous forme d'un fichier XML.
8. Importation un fichier XML qui contient la configuration globale de système (les états, les règles de vie et de transitions et l'image simulé) pour continuer l'évolution.
9. Création de maille (gride de cellule) à partir d'une image satellitaire après une phase de segmentation (comme perspective au futur).

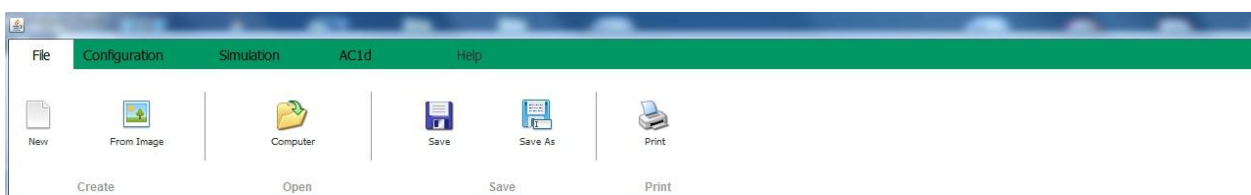


Fig 4.2 Le menu "File"

3.2. Le menu "Configuration"

1- La Base de règles: On ouvre la base de règles par la commande du menu :

"Configuration ->stats and rules

Les règles définissent le modèle de fonctionnement de l'automate.

Il y a trois partie dans la base de règles :

-partie de gauche : liste hiérarchisée pour la définition des couches et des états, qui ont chacun un numéro d'ordre, un identifiant une description et une couleur et un symbole de forme.

La couleur de chaque état se définit en cliquant sur le rectangle de couleur ou dans la fenêtre "Contrôle -> Légende" en cliquant sur la case colorée.

-partie centrale : définition des durées de vie des cellules, durée infinie, fixée ou aléatoire (selon une espérance et un écart-type). Lorsque le modèle ne nécessite pas de définir des durées de vie, cette partie reste vierge.

-partie de droite : définition des règles de transition.

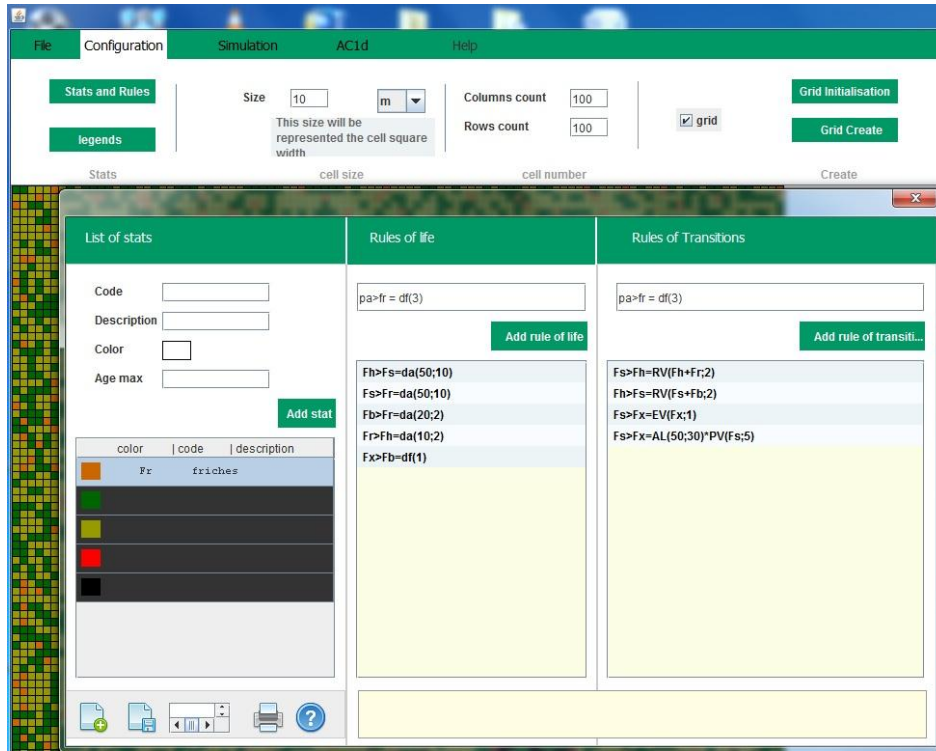


Fig 4.3 Le menu "Configuration"

3.3. Le menu "Simulation"

C'est le menu de pilotage du système, qui permet de lancer un pas de simulation ou de le faire marcher en continu, de l'arrêter, de repartir au début, etc.



Fig 4.4 Le menu "Simulation"

3.4. Initialisation automatique de maille

Toutes ces règles dépendent néanmoins d'un certain nombre de paramètres qu'on - le type de maillage en cellules : carrées ou hexagonales, Et - on peut y définir des attributs graphiques, comme afficher ou masquer la maille qui entoure les cellules (décocher le combobox si l'on ne veut pas d'entourage).

- des paramètres permettent de définir le domaine cellulaire :
- nombre de lignes et de colonnes

- géo référencement (positionnement terrain)
- taille du carreau (sur le terrain)

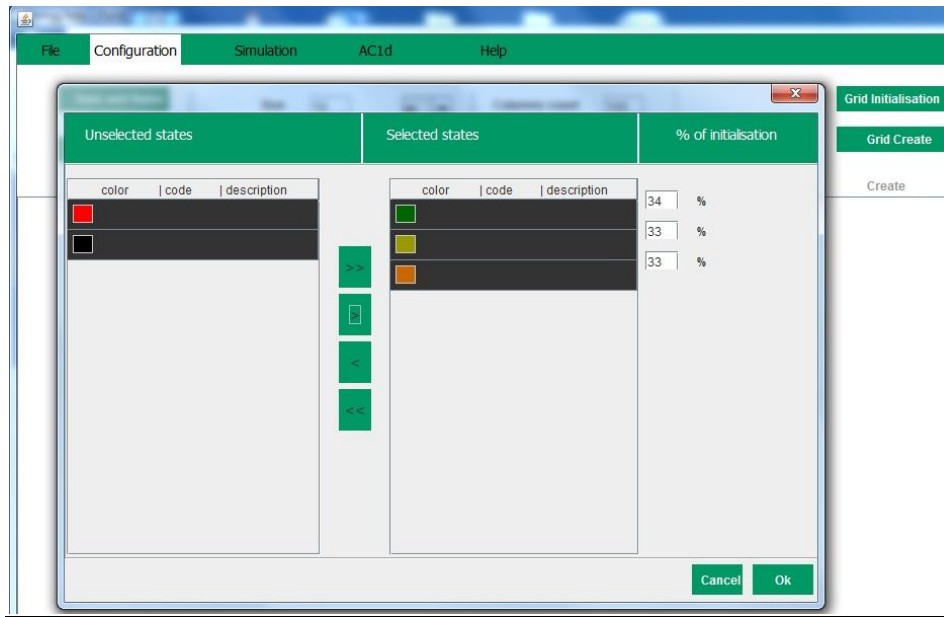


Fig 4.5 Initialisation automatique de maille 3.5.

Le menu "AC1D"

Sous cette menu nous présentons les 256 automates cellulaires élémentaire, l'utilisateur doit saisi directement le numéro de la règle puis lancer la simulation, il peut aussi changer le nombre des lignes et de colonnes et les couleurs de cellules.

Automates qui produisent un triangle de Sierpinski: 18, 22, 26, 82, 90, 94, 102, 110 ,122, 126, 129, 133, 146, 153, 154, 161, 165, 167, 181, 182, 183, 195, 210, 218

Parmi ces deux, le 154, le 166, le 180 et le 210 ont une propriété intéressante.

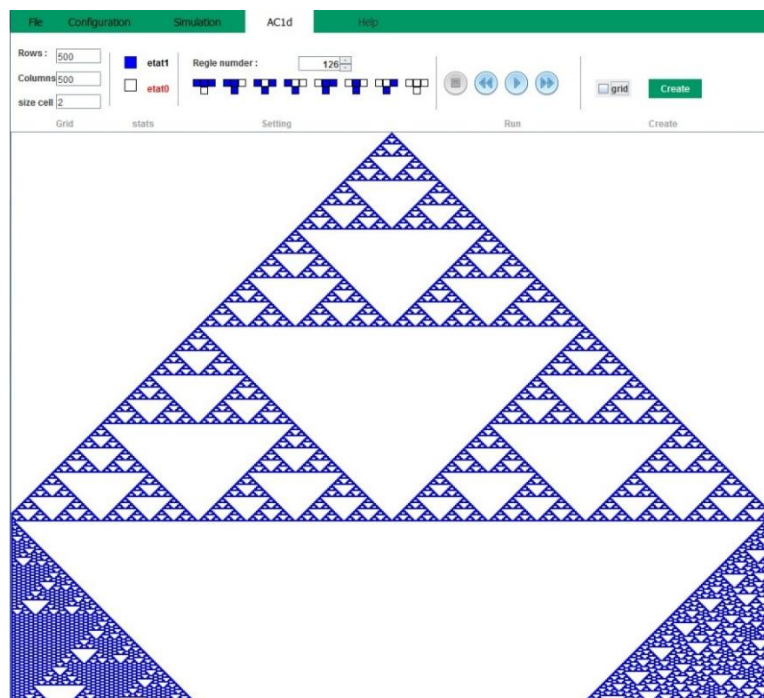


Fig 4.6 automate cellulaire 1D, la règle 126 3.6. Le menu "Help"

Contient des informations sur le logiciel, son principe de travail, la grammaire utilisée, les règles élémentaires de base, des exemples de règles de transition et de vie utilisés pour faire des simulations...etc.



Fig 4.7 Le menu "Help"

4. La synchronisation des transitions

On peut choisir le mode d'ordonnement de l'exécution des cellules durant une itération de l'automate (c'est-à-dire un pas de temps):

- en mode synchrone : toutes les cellules sont calculées à l'instant $t+1$ à partir de leur état à l'instant t , elles changent donc toutes en même temps.
- en mode asynchrone : les cellules sont modifiées les unes après les autres. Pour éviter un effet de balayage, l'ordre de calcul de l'ensemble des cellules est différent à chaque pas de temps (tirage sans remise).

5. Choix d'un type de configuration initiale

Le logiciel permet de sélectionner trois façons de construire une configuration initiale de l'état des cellules :

- depuis fichier XML : lorsque les cellules proviennent de la lecture d'un fichier, c'est la configuration initiale par défaut.
- aléatoire : l'état de chaque cellule est tiré au hasard dans l'ensemble des états.
- avec l'état sélectionné : l'état des cellules sera initialisé avec l'état coché dans le menu "Saisie". Si aucun état n'est coché, c'est le premier état de la liste qui sera utilisé.

6. Terminologie

Cellule: On appelle cellule $C(i,j)$ une portion d'espace définie par une case de coordonnées (i,j) divisant le domaine selon une partition régulière (en carrés, en hexagones, etc.) de l'automate.

Chaque cellule $C(i,j)$ est munie à chaque instant t d'un état $E_{ij}(t)=X$ qui est une valeur qualitative.

Automate Cellulaire : Un automate cellulaire est défini par un domaine D , par une partition de D en cellules, d'un ensemble d'états, d'un ensemble de règles de transition des états et d'un mécanisme M d'évolution temporelle gérant les transitions d'états des cellules.

Individu : C'est une cellule $C(i,j)$ munie d'un état X donné, la durée de vie d'un individu est le temps pendant lequel la cellule conserve son état X .

Classe : C'est l'ensemble des individus ayant un état donné X

Population : C'est un ensemble d'individus de différentes classes X_1, \dots, X_k

Transition : Une transition est la possibilité pour une cellule de pouvoir passer d'un état X à un état Z ($X > Z$). Une transition est formalisée par une règle de transition écrite dans la base de règle (partie droite), dans le langage de logicielle .

La force de transition P représente la possibilité plus ou moins grande pour un individu de changer d'état. Une règle de transition se présente alors sous la forme générale:

$$X > Z = P$$

7. Principes de fonctionnement

Vie et mort des cellules:

Les cellules peuvent être munies d'une durée de vie. Il y a trois manières de définir la durée de vie d'une classe d'état X .

- durée infinie : $X > Z = DI$

Ces individus ne peuvent plus changer d'état.

- durée aléatoire : $X > Z = DA$ (Esp, Ect)

Ces individus ont une durée de vie définie par une espérance de vie "Esp" et un écart-type "Ect" qui est propre à sa classe.

- durée fixe : $X > Z = DF(v)$

Ces individus ont une durée de vie fixée à une valeur précise " v ".

Chaque individu possède une durée maximale de vie (**AgeMax**) qui lui est donnée à sa naissance, mais si les conditions d'environnement sont défavorables, il peut mourir prématurément.

A chaque instant, un individu possède une force de vie lui permettant de conserver son état X à l'instant suivant ($X > X$). La force de vie de chaque cellule i est calculée au cours de la simulation par une fonction f qui dépend de son âge:

$$f(i, \text{Age}) = 1 - \text{Age}(i) / \text{AgeMax}$$

Si la durée de vie de la cellule est infinie, sa force de vie vaut toujours 1.

Lorsque la force de vie d'un individu est épuisée, celui-ci meurt et se transforme dans un autre état Z qui est propre à sa classe, l'état de mort.

8. Transformation des cellules : les transitions

A chaque instant t , tout individu dans un état X peut se transformer, selon les conditions, en un autre état, Z parmi différents états possibles, Z_1, Z_2, \dots, Z_k . Si l'individu reste en vie il garde son état à l'instant suivant.

La transformation des cellules est régie par des règles de transition qui dépendent de la force de vie propre à chaque individu et des forces concurrentes des individus évoluant dans son environnement.

Chaque individu est soumis à des interactions environnementales qui peuvent aboutir à son changement d'état. A chaque instant et en chaque lieu, ces interactions génèrent des forces extérieures $F(X \rightarrow Z_1), F(X \rightarrow Z_2), \dots, F(X \rightarrow Z_k)$ sur l'individu présent.

Si sa force de vie intérieure $F(X \rightarrow X)$ est supérieure à ces forces extérieures, il continue de vivre, sinon il se transforme dans l'état dont la force de transition est prépondérante.

9. Forces d'interaction:

La force de transition P d'une règle $X \rightarrow Z = P$ se décompose en une expression combinant des forces d'interactions. La force d'interaction $F(Y;R)$ agissant sur un individu d'état X est définie par le rayon d'action R autour de la cellule et par une population (Y) d'individus de différentes classes Y_1, \dots, Y_k (on écrit $Y = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_k$) qui génère cette interaction. $F(Y;R)$ est soit une fonction continue qui prend ses valeurs dans l'intervalle réel $[0,1]$ soit une fonction binaire $\{0, 1\}$.

a) On distingue des fonctions continues d'interaction :

PV(Y;R): Interaction qui mesure la proportion de présence de la population Y dans le voisinage circulaire de rayon R autour de la cellule. sa valeur est définie par la fréquence de présence de Y dans le disque de rayon R centré sur la cellule, la fonction de présence étant pondérée par une fonction décroissante de la distance au centre. (ce disque peut être tronqué aux bord du domaine, le disque de voisinage est alors réduit en conséquence).

AV(Y;R): Interaction qui mesure la proportion de non-présence de la population Y dans le voisinage circulaire de rayon R autour de la cellule.

AV est construite selon la formule : $AV(Y;R) = 1 - PV(Y;R)$

Tous les autres fonctions élémentaires d'interaction sont détaillé dans l'annexe **B**

b) syntaxe étendue (Annexe B)

Pour ces fonctions on dispose aussi d'une syntaxe étendue, leur permettant de définir un intervalle de valeurs $[Min, Max]$. Si la fonction donne un résultat dans cet intervalle, elle renvoie 1 sinon 0. Par exemple, au lieu d'écrire $PV(Fr;5)$ on écrira $PV(Fr;5;0.5;1)$, cette fonction renvoie 1 si la valeur de $PV(Fr;5)$ est dans l'intervalle $[0.5, 1]$ et renvoie 0 sinon.

c) On dispose aussi d'autres fonctions d'interaction à valeurs binaires (0 ou 1) :

(Annexe B)

$EV(Y;R)$: s'il existe au moins un individu de la population Y dans le voisinage de rayon R, la fonction EV donne la valeur 1, sinon elle renvoie 0.

$RV(Y;R)$: si le voisinage de rayon R est remplis uniquement par des individus de la population Y, alors RV donne la valeur 1, sinon elle renvoie 0.

d) Enfin on a 7 fonctions événementielles qui permettent de définir des Évènements programmés (EP), des aléas simple (AS) ou multiples (AM) :

9.1. Calcul d'une force de transition:

Pour chaque transition $X \rightarrow Z_i$ la force de transition est définie par la moyenne pondérée de produits de forces d'interactions. La pondération permet de donner plus ou moins d'importance à chaque interaction dans sa contribution à la force de transition. Par exemple,

$$F(X \rightarrow Z_i) = \{K_1.F(Y_1;R_1) + K_2.F(Y_2;R_2)*F(Y_3;R_3) + \dots + K_h.F(Y_h;R_h)\} / (K_1+K_2+\dots+K_h)$$

dans l'écriture des règles on n'indique pas le dénominateur qui est calculé automatiquement

9.2. Mécanisme de transition:

A chaque instant t et en chaque cellule d'état $E(t)=X$, si les transitions possibles de l'état X sont $(Z_0, Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$, avec $Z_0=X$, la valeur d'état $E(t+1)$ sera définie par l'état Z_i dont la force $F(X \rightarrow Z_i)$ est maximale.

Si $Z_i=X$, c'est la force de vie qui l'emporte, sinon c'est la transition dont la force est maximale.

10. Syntaxe des règles de la base de connaissance de l'automate Cellulaire:

Une base règles est constituée d'une suite de lignes de texte, chaque ligne décrit les règles associées à une transition. La base de règles est construite selon une grammaire qui donne les règles de construction du langage, appelées règles de production du langage.

La description de la grammaire est elle-même décrite selon la syntaxe suivante:

Une chaîne de caractères entre chevrons comme <lettres> désigne un symbole non terminal du langage, il sera donc défini plus loin dans les règles.

Une suite de caractères non encadrée désigne un symbole terminal du langage, donc qui apparaîtra tel quel dans le texte.

Une règle de production contient un membre gauche (le syntagme) et un membre

droit (les paradigmes) séparés par "::<=".

Le syntagme est le symbole résultat de la production, le membre de droite est constitué d'une ou plusieurs lignes, chaque ligne définissant un paradigme possible pour la production du syntagme correct.

Pour former un paradigme, on procède par concaténation des syntagmes qui le composent. Le langage est ainsi défini de manière récursive.

La Syntaxe de grammaire utilisé pour définit le langage de logicielle est décrit dans **l'annexe A**
Exemples de liste des règles de transitions avec ses traductions en langage naturel est décrit dans **l'annexe C**

Conclusion générale

Dans cette mémoire on a travaillé sur le développement de modèles permettant la caractérisation du comportement d'un feu de forêt avec comme objectif affiché, le souhait d'être capable de proposer aux opérationnels un outil d'aide à la décision robuste et validé à l'échelle du terrain. 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.

L'outil développé serait un système expert qui suivent l'évolution de propagation de feux et de la végétation en temps réel par la vision 2D.

Notre choix a surtout été dicté par le fait que notre principal objectif est de fournir un modèle en capacité de représenter numériquement, en temps réel et de manière réaliste la propagation, le comportement d'un incendie sur un territoire donné suivant plusieurs scénarii. Ce travail doit être considéré comme la première étape d'une démarche plus globale devant fournir aux opérationnels, à court ou moyen terme, un outil complet d'aide à la décision en phase de lutte ou lors de l'aménagement de la forêt.

Perspectives

Mes perspectives de recherche peuvent se scinder en deux axes principaux qui sont détaillés

- Ajout une phase de segmentations d'une image satellitaires de n'importe quelle zone de territoire.

Comme nous l'avons vu dans logiciel le maillage est rempli de manière soit automatique soit manuels. Le simulateur ne prenait en compte le traitement direct des image satellitaire (segmentation et télédétection).

- L'absence de prise en compte d'un élément très important dans la propagation des feux de forêts celle de vent.

L'objectif de ce travail est de développés un outil d'aide à la décision dans le cadre des efforts de diminuer les pertes de feux de forêts.

Annexe A : Grammaire du langage ACG:

La grammaire défini ci-après est celle utilisé dans l'application **SpaCelle** réalisé à l'Université de Rouen-France.

les symboles prédéfinis utilisés sont les suivants:

- rl : caractère de retour à la ligne
- car : caractère alphanumérique quelconque
- lettre : caractère alphabétique quelconque
- naturel : nombre entier sans signe (suite de chiffres)

La base de règles s'écrit alors selon la grammaire suivante :

<base de règles> ::= <règle> rl

<règle> rl <base de règles>

<règle> ::= <transition> = <combinaison d'interactions>

<transition> = <durée de vie>

<transition> ::= <Etat><Etat>

<combinaison d'interactions> ::=

<interaction>

<interaction> + <combinaison d'interactions> // addition

<interaction> * <combinaison d'interactions> // multiplication

<interaction> ::=

<Fonction>

<intensité><Fonction>

<Fonction> ::=

<Fonction spatiale>

<Fonction événementielle>

<Fonction spatiale> ::=

PV(<Etats> ; <rayon>) // prop de présence dans le voisinage

PV(<Etats> ; <rayon> ; <Min> ; <Max>)

AV(<Etats> ; <rayon>) // prop d'absence dans le voisinage

AV(<Etats> ; <rayon> ; <Min> ; <Max>)

AC(<Etats> ; <rayon>) // accessibilité

AC(<Etats> ; <rayon> ; <Min> ; <Max>)

EV(<Etats> ; <rayon>) // Il existe dans le voisinage

ZV(<Etats> ; <rayon>) // Aucun dans le voisinage

RC(<Etats> ; <rayon>) // Remplis le voisinage

NV(<Etats> ; <rayon> ; <n>) // nbr de voisins égal à n

NV(<Etats> ; <rayon> ; <nMin> ; <nMax>) // nbr de voisins compris entre

// nMin et nMax

SV(<Etats> ; <rayon> ; <n>) // nbr de voisins différent de n

```

SV( <Etats> ; <rayon> ; <nMin> ; <nMax> ) // nbr de voisins non compris entre
    // nMin et nMax
AP( <Etats> ; <rayon> ) // aléa 1 ou 0 selon prop de présence
AA( <Etats> ; <rayon> ) // aléa 1 ou 0 selon prop d'absence
BA( <Etats> ; <rayon> ) // barrière selon prop de présence
BA( <Etats> ; <rayon> ; <Min> ; <Max> ) // vaut 1 si BA compris entre Min et
Max
AB( <Etats> ; <rayon> ) // barrière selon prop d'absence
AB( <Etats> ; <rayon> ; <Min> ; <Max> ) // vaut 1 si AB compris entre Min et
Max

<Fonction événementielle> ::=
    EP( <date> ) // Evènement Programmé au bout de n
// années (T=n):
    EP( <date> ; <durée> ) // Evènement Programmé en T=n , selon
// une durée fixe de d ans.
    EP( <date> ; <espérance> ; <écart-type> ) // Evènement Programmé en T=n ,
    // selon une durée gaussienne (d,e)
    AL( <date> ) // Evènement Aléatoire simple ponctuel:
    // vaut 1 en moyenne ts les n ans
    AL( <date> ; <durée> ) // Evènement Aléatoire simple avec durée
    // fixe: idem mais pour d ans
    AL( <date> ; <espérance> ; <écart-type> ) // Evènement Aléatoire simple avec
    // durée gaussienne (d,e)
    AM( <Nbr Evts> ; <périodicité> ) // probabilité d'aléa multiple (Poisson)

<durée de vie> ::=
    DA( <espérance> ; <écart-type> ) //durée aléatoire
    DF( <durée> ) //durée fixe
    DI // durée infinie

<Etats> ::= <Etat> // état simple
<Etat> + <Etats> // réunion d'états

<Etat> ::= lettre
    lettre car
    lettre car car
    lettre car car car

<rayon> ::= naturel

<espérance> ::= naturel

<écart-type> ::= naturel

<date> ::= naturel

```

<durée> ::= naturel

<Nbr Evts> ::= naturel

<périodicité> ::= naturel

<nMin> ::= naturel

<nMax> ::= naturel

<n> ::= naturel

<Min> ::= <reel>

<Min> ::= <reel>

<reel> ::= <signe><partie entière><séparateur décimal><partie décimale>
naturel

<signe> ::= "+"
"_"
"*"

<partie entière> ::= naturel

<séparateur décimal> ::= "."
","

<partie décimale> ::= naturel

Remarques :

- 1) On peut utiliser aussi bien le point que la virgule pour écrire.
- 2) On utilise normalement le point-virgule ";" comme séparateur entre nombres,

Annexe B : Les Forces d'interaction:

La règle de transition P d'une règle $X > Z = P$ se décompose en une expression combinant des forces d'interactions.

La force d'interaction $F(Y;R)$ agissant sur un individu d'état X est définie par le rayon d'action R autour de la cellule et par une population (Y) d'individus de différentes classes Y_1, \dots, Y_k (on écrit $Y=Y_1+Y_2+\dots+Y_k$) qui génère cette interaction. $F(Y;R)$ est soit une fonction continue qui prend ses valeurs dans l'intervalle réel $[0,1]$, soit une fonction binaire $\{0, 1\}$

a) fonctions d'interaction continues à valeurs dans $[0,1]$

1- $PV(Y;R)$: Interaction qui mesure la proportion de présence de la population Y dans le voisinage circulaire de rayon R autour de la cellule.

sa valeur est définie par la fréquence de présence de Y dans le disque de rayon R centré sur la cellule.

2- $PV(Y;R;Min;Max)$: égale 1 si la proportion de présence de Y est dans l'intervalle $[Min;Max]$

3- $AV(Y;R)$: Interaction qui mesure la proportion de non-présence de la population Y dans le voisinage circulaire de rayon R autour de la cellule. AV est construite selon la formule : $AV(Y;R)=1-PV(Y;R)$

4- $AV(Y;R;Min;Max)$: égale 1 si la proportion de non-présence de Y est dans l'intervalle $[Min;Max]$

5- $AC(Y;R)$: Interaction qui mesure l'accessibilité de la cellule en cours aux cellules de la population, sachant que la valeur d'accessibilité est divisée par 2 à une distance R du centre. La fonction d'évaluation de l'accessibilité est $f(d)=1/(1+d/R)$ où d est la distance de la cellule la plus proche ayant la valeur Y.

6- $AC(Y;R;Min;Max)$: accessibilité aux états de Y selon un demi-effet à distance R

7- $BA(Y;R)$: Fonction barrière calculée par la proportion de présence de voisins de type Y dans le voisinage de rayon R.

8- $BA(Y;R;Min;Max)$ // vaut 1 si BA compris entre Min et Max

9- $AB(Y;R)$: Fonction barrière calculée par la proportion de d'absence de voisins de type Y dans le voisinage de rayon R.

10- $AB(Y;R;Min;Max)$: vaut 1 si AB compris entre Min et Max

b) fonctions d'interaction à valeurs binaires (0 ou 1) :

11- $EV(Y;R)$: s'il existe au moins un individu de la population Y dans le voisinage de rayon R, la fonction EV donne la valeur 1, sinon elle renvoie 0.

12- $RV(Y;R)$: si le voisinage de rayon R est remplis uniquement par des individus de la population Y, alors RV donne la valeur 1, sinon elle renvoie 0.

13- $ZV(Y;R)$: s'il n'existe aucun individu de la population Y dans le voisinage de rayon R, la fonction EV donne la valeur 1, sinon elle renvoie 0.

14- $NV(Y;R;n)$: Qui vaut 1 s'il y a exactement n voisins de type Y dans le voisinage de rayon R, et 0 sinon.

15- **NV(Y;R;nMin;nMax)** : Qui vaut 1 si le nombre de voisins est dans l'intervalle fermé $[nMin, nMax]$, et 0 sinon.

16- **SV(Y;R;n)** : Qui vaut 1 si le nombre de voisins est différent de n , et 0 s'il y a exactement n voisins. donc SV est le contraire de NV.

17- **SV(Y;R;nMin;nMax)** : Qui vaut 1 si le nombre de voisins n'est pas dans l'intervalle $[nMin, nMax]$, et 0 sinon. donc SV est le contraire de NV.

18- **AP(Y;R)** : Fonction aléatoire qui renvoie 1 selon une probabilité calculée par la proportion de présence de voisins de type Y dans le voisinage de rayon R.

19- **AA(Y;R)** : Fonction aléatoire qui renvoie 1 selon une probabilité calculée par la proportion d'absence de voisins de type Y dans le voisinage de rayon R.

c) Enfin on a 7 fonctions événementielles qui permettent de définir des événements programmés (EP), des aléas simple (AS) ou multiples (AM) :

20- **EP(n)** : Evènement Programmé au bout de n années : prend la valeur 1 lorsque le temps T vaut n , et vaut 0 avant et après.

21- **EP(n;d)** : Evènement Programmé en $T=n$, selon une durée fixe de d ans.

22- **EP(n;d;e)** : Evènement Programmé en $T=n$, selon une durée aléatoire moyenne de d années et un écart-type de e années.

23- **AL(n)** : Aléa, prend la valeur 1 en moyenne n fois par unité de temps, procède par un tirage aléatoire uniforme de probabilité n/N , où N est l'effectif total de cellules $N=nc*nl$

24- **AL(n;d)** : Aléa, prend la valeur 1 en moyenne n fois toutes les d unités de temps, procède par tirage aléatoire uniforme de probabilité n/dN .

25- **AL(n;d;e)** : Aléa avec durée gaussienne:

Comme le précédent mais les événements se produisent sur variable de moyenne d et avec un écart-type de e . (par un tirage aléatoire uniforme de probabilité n/dN pour le déclenchement, suivi d'un tirage aléatoire gaussien de moyenne d et d'écart-type e pour la durée)

26- **DE(Y)** : Densité de la population $Y=Y_1+Y_2+...Y_k$, par rapport à la population totale du domaine

27- **DE(Y;max)** : calcule un taux de croissance qui vaut 1 si la densité de Y est nulle et qui tend vers 0 lorsque la densité de Y tend vers max , (et vaut 0 lorsque la densité est supérieure ou égale à max)

28- **DE(Y;Min;Max)** : vaut 1 si la densité de Y est dans l'intervalle $[Min;Max]$

d) Pour définir la durée de vie:

29- **DI** : durée de vie infinie

30- **DF(d)** : durée fixe de d années

31- **DA(d;e)** : durée aléatoire d'espérance d et d'écart-type e

Annexe C : Règles de transitions:

Dans cette annexe on va donner des exemples des règles de transitions qui permet de simuler feu de la forêt et le jeu de la vie.

Ses règles sont assez simples que possible est défini pour faire une présentation de simulation, et l'utilisateur peut définir d'autres règles plus complexes qu'il veut les à partir des règles élémentaires de la grammaire.

1. Le feu de la forêt :

Le tableau ci-dessus illustre les règles de transition utilisées pour simuler le phénomène naturel feu de la forêt et son traduction en langage naturel

Règles	Signification en langage courant
$F_s > F_h = RV(F_h + F_r; 2)$	Forêt sèche peut devenir Forêt humide si le voisinage de rayon 2 est rempli uniquement par des individus de Forêt humide ou Friches
$F_s > F_x = EV(F_x; 1)$	Forêt sèche peut devenir en Feu si il existe au moins un individu dans le voisinage en feu
$F_s > F_x = AL(50; 30) * PV(F_s; 5)$	50 cellules Forêt sèche, choisies aléatoirement, deviennent en feu tous les 30 unités de temps, et si la proportion de présence de Forêt sèche dans le voisinage circulaire de rayon 5.
$F_h > F_s = RV(F_s + F_b; 2)$	Forêt humide peut devenir Forêt sèche si le voisinage de rayon 2 est rempli uniquement par des individus de Forêt sèche ou Forêt brûlé.

Le tableau ci-dessus illustre les règles de vies utilisées pour simuler le

Règles	Signification en langage courant
$F_h > F_s = da(50; 10)$	Forêt humide devient Forêt sèche après une durée aléatoire d'espérance 50 et d'écart-type 10
$F_b > F_r = da(20; 2)$	Forêt brûlée devient Friches après une durée aléatoire d'espérance 20 et d'écart-type 2.
$F_x > F_b = df(1)$	Cellule en feu devient brûlée après une unité de temps.
$F_s > F_r = da(50; 10)$	Forêt sèche devient Friches après une durée aléatoire d'espérance 50 et d'écart-type 10
$F_r > F_h = da(10; 2)$	Friches deviennent Forêt humide après une durée aléatoire d'espérance 10 et d'écart-type 2

2. Le jeu de la vie :

Le tableau ci-dessus illustre les règles de transition utilisées pour simuler le jeu de la vie de **conway** et son traduction en langage naturel

Règles	Signification en langage courant
$m > v = nv(v; 1; 3)$	Une cellule morte peut devenir en vie s'il y a exactement 3 voisins en vie dans le voisinage de rayon 1.
$v > m = sv(v; 1; 2; 3)$	Une cellule en vie peut devenir morte si le nombre de voisins en vie n'est pas dans l'intervalle 2,3 dans le voisinage de rayon 1.

Bibliographie

- [1] André Langlois, Michel Phipps, 1997 ,Automates cellulaires: Application à la simulation urbaine, Hermes Science Publications,Paris ,France
- [2] Azzedine Mohamed Touffik Arfa et all ,2019, Cartographie du risque feu de forêt dans le Nord-est algérien : cas de la wilaya d'El Tarf.
- [3] Dubos-Paillard E., Guermond Y., Langlois P., 2003 Analyse de l'évolution urbaine par automate cellulaire *Le modèle SpaCelle, L'Espace géographique, 2003/4 (tome 32)*
- [4] Basiliu Moretti., 2016. Modélisation du comportement des feux de forêt pour des outils d'aide à la décision
- [5] Mark A. Finney ,2004. FARSITE: Fire Area Simulator—Model Development and Evaluation
- [6] Porterie et al., 2005,Un Réseau de Petit Monde local à sites pondérés pour les feux de forêts, C. R. Physique 6
- [7] Balbi J.H., Rossi J.L., Marcelli T., Chatelon F.J. (2010) Physical Modeling of Surface Fire Under Nonparallel Wind and Slope Conditions. Combustion Science and Technology.
- [8] Burgan, R. and Rothermel, R. (1984). BEHAVE : fire behavior prediction and fuel modeling system -- FUEL subsystem. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 126 pp.
- [9] Stephen Wolfram,1984,Statistical mechanics of cellular automata
- [10] Nicolas OLLINGER,2002 , Automates cellulaires :structures
- [11] Masanao Takeyama, Helen Couclelis,1997,. Map dynamics: Integrating cellular automata and GIS through geo-algebra
- [12] Lionel Tabourier. Caractériser l'analogie entre automates cellulaires déterministes et systèmes physiques. Lato Sensus, revue de la Société de philosophie des sciences, Société de philosophie des sciences, 2018, 5 (2), pp.13-31. 10.20416/LSRSPS.V5I2.2. hal-02085266.
- [13] Stephen Wolfram , Cellular Automata as Simple Self-Organizing Systems , Physics Department, California Institute of Technology, Pasadena CA 91125 (July 1982; revised November 1982)
- [14] Waldo Tobler , 1979,Cellular Geography.
- [15] R White, G Engelen,1993, Cellular Automata and Fractal Urban Form: A Cellular Modelling Approach to the Evolution of Urban Land-Use Patterns
- [16] M Batty, H Couclelis, M Eichen,1997,Urban Systems as Cellular Automata
- [17] Dominique Badariotti, Arnaud Banos y Diego Moreno ,2006, Conception d'un automate cellulaire non stationnaire à base de graphe pour modéliser la structure spatiale urbaine: le modèle Remus