Jean-Philippe Rennard 12/2000
http://www.rennard.org/alife -- alife@rennard.org

Introduction aux Automates Cellulaires

La littérature sur les automates cellulaires est immense et les ressources Internet qui y sont consacrées sont légions. L'objectif ici est beaucoup plus limité. Ce site se voulant voué aux profanes, je me contenterai d'apporter des éléments de réponse aux deux questions essentielles que se pose toute personne découvrant les automates cellulaires, généralement après une phase d'intense perplexité :

- Mais qu'est ce que cela peut bien être ?
- À quoi est ce que cela peut bien servir ?

La réponse à ces questions est malheureusement loin d'être simple. Les automates cellulaires sont des constructions abstraites aux propriétés très complexes et dont l'abord n'est pas immédiat.

A- Historique

On fait généralement remonter l'histoire des automates cellulaires aux années quarante et à Stanislas Ulam. Ce mathématicien s'est intéressé à l'évolution de constructions graphiques engendrées à partir de règles simples. La base en était un espace à deux dimensions divisé en « cellules », soit une sorte de feuille quadrillée. Chacune des cellules pouvait avoir deux états : allumé ou éteint. Partant d'une configuration donnée, la génération suivante était déterminée en fonction de règles de voisinage. Par exemple, si une cellule donnée était en contact avec deux cellules allumées elle s'allumait sinon elle s'éteignait. Ulam, qui utilisait l'un des premiers ordinateurs, a rapidement constaté que ce mécanisme permettait de générer des figures complexes et esthétiques et que dans certains cas, ces figures pouvaient se répliquer. Des règles extrêmement simples permettaient de construire des structures très complexes. À partir de là, se posait la question suivante : ces mécanismes récursifs — c'est-à-dire en l'occurrence dépendant de leur propre état antérieur — peuvent-ils expliquer la complexité du réel ? Cette complexité n'est elle qu'apparente, les lois fondamentales étant elles-mêmes simples [1] ?

En parallèle, John von Neumann — fort des travaux de A. Turing — s'intéressait à la théorie des automates autoréplicateurs et travaillait à la conception d'une machine autoréplicatrice le « kinématon. » Une telle machine devait être capable, à partir de matériaux trouvés dans l'environnement, de produire n'importe quelle machine décrite dans son programme, y compris une copie d'elle-même. Von

1. Heudin JC, *La Vie Artificielle,* Hermès, Paris, 1994, pp. 35 et suivantes. Stephen Wolfram a systématisé cette approche dans son dernier livre *A New Kind of Science*, Wolfram Media, 2002.

Neumann montrait ici comment résoudre le problème de l'autoréférence de la description. Pour s'autorépliquer, la machine devrait en effet contenir une description d'elle-même, mais pour être complète, cette description doit également être décrite, etc. La solution réside dans la capacité donnée à la machine d'interpréter sa description à la fois comme un programme, une séquence d'instruction, et comme un composant. La description sera d'abord interprétée pour construire la nouvelle machine, elle sera ensuite simplement copiée afin de donner à la nouvelle machine une description d'elle-même. Ce mécanisme correspond de fait à l'interprétation actuelle du fonctionnement de la molécule d'ADN découverte après les travaux de von Neumann. A.C. Clarke a rendu les machines de von Neumann célèbre avec la série « *2001 Odyssée de l'espace.* » Pour transformer Jupiter en étoile, un premier monolithe se reproduit, les descendants font de même, la population croît ainsi de manière exponentielle pour atteindre rapidement la taille nécessaire à la réalisation d'une aussi gigantesque tâche.

C'est S. Ulam qui a suggéré à von Neumann d'utiliser ce qu'il appelait les « espaces cellulaires » (*cellular spaces*) pour construire sa machine autoréplicatrice. Il pouvait ainsi s'affranchir des conditions physiques réelles pour travailler dans un univers extrêmement simplifié pourtant apte à engendrer une haute complexité. Le passage à cet univers formel l'a amené à constater :

« En axiomatisant les automates [autoréplicateurs] de cette manière, on a jeté la moitié du problème par la fenêtre et c'est peut-être la moitié la plus importante. On s'est résigné à ne pas expliquer comme ces éléments sont constitués de choses réelles, particulièrement comment ces éléments sont constitués de particules élémentaires ou même de molécules (…) on considérera simplement que des particules élémentaires dotées de certaines propriétés existent. La question à laquelle on espère répondre, ou au moins examiner, est : Quels principes sont mis en œuvre dans l'organisation de ces molécules dans les êtres vivants fonctionnels (…) Je discuterai de tout cela seulement de ce point de vue limité [1]. »

Sur cette base, il conçut un automate cellulaire de quelques 200.000 cellules à 29 états contenant un copieur universel, une description de lui-même et une machine de Turing pour la supervision.

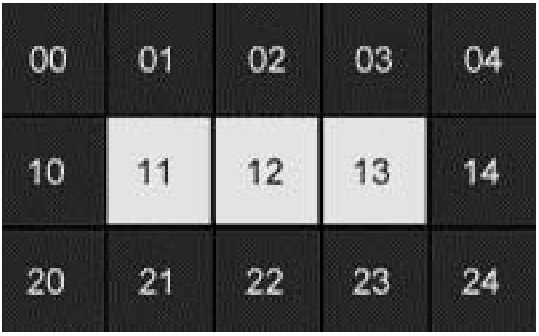
Les automates cellulaires sont sortis des laboratoires en 1970 avec le désormais fameux *Jeu de la vie* (*Life Game*) de John Horton Conway.

B- Le Jeu de la vie

À l'origine, le Jeu de la vie fut présenté comme un jeu mathématique. Sa description va nous permettre de matérialiser et mieux comprendre ce que sont les automates cellulaires.

1. Von Neumann J. et Burks A. ed., *Theory of Self-Reproduction Automata,* University of Illinois Press, 1966, p. 77.

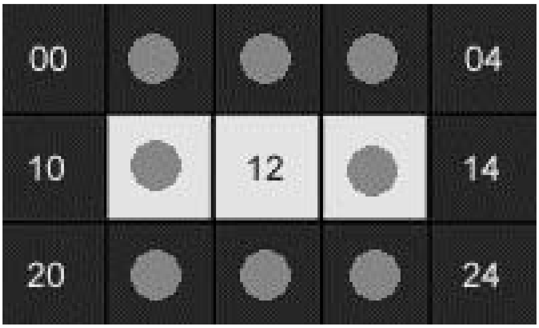
À l'instar des espaces cellulaires d'Ulam, le Jeu de la vie se présente sous la forme d'une grille constituée de cellules, par exemple :



Exemple de configuration de départ

L'univers est limité ici à un rectangle de 5 par 3. Pour faciliter l'explication, nous avons numéroté les cellules de 0 à 4 en horizontal et de 0 à 2 en vertical. Les cellules claires sont actives.

Dans le Jeu de la vie, est considérée comme voisine toute cellule contiguë, y compris les diagonales.



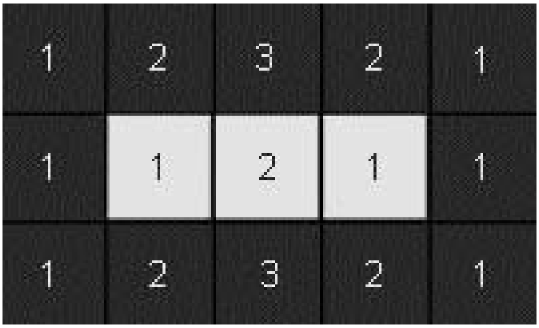
Détermination du voisinage

La figure ci-dessus montre le voisinage de la cellule 12. En l'occurrence, sur les huit voisins, deux sont actifs.
Les règles du Jeu de la vie sont simples :

- Une cellule inactive entourée de 3 cellules actives devient active (« naît ») ;
- Une cellule active entourée de 2 ou 3 cellules actives reste active ;
- Dans tous les autres cas, la cellule « meurt » ou reste inactive.

On peut interpréter ces règles en considérant qu'une naissance nécessite un certain rassemblement de population (3 en l'occurrence), que les cellules ne peuvent survivre à un trop grand isolement (moins de 2 voisines) et qu'une trop forte concentration (plus de 3 voisines) les étouffe.

Les automates cellulaires fonctionnent de manière *discrète*. C'est-à-dire que le temps s'écoule par à-coups. Ceci signifie dans notre cas qu'à la génération *t*, chaque cellule examine son environnement et détermine son état futur. Quand l'ensemble des cellules a été traité, et seulement à ce moment là, toutes les cellules passent à l'état calculé. On simule ainsi un traitement parallèle.
Illustrons ce mécanisme à partir de la configuration précédente :

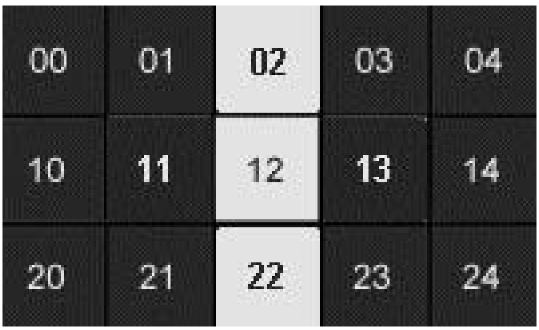


Valeurs de voisinage

Dans le schéma précédent, le nombre de voisins actifs est noté pour chaque cellule :

- Les cellules inactives 00, 04, 10, 14, 20 et 24 ont une voisine active et restent donc en l'état.
- Les cellules inactives 01, 03, 21 et 23 ont deux voisines, elles ne changent donc pas.
- Les deux cellules inactives restantes (02 et 22) ont trois voisines actives, la règle 1 s'applique : elles naissent.
- Les cellules actives 11 et 13 n'ont qu'une voisine active : elles meurent.
- Enfin la cellule active 12 ayant deux voisines actives elle reste en vie.

À la génération suivante, seules les cellules 02, 12 et 22 seront donc actives.



Seconde génération

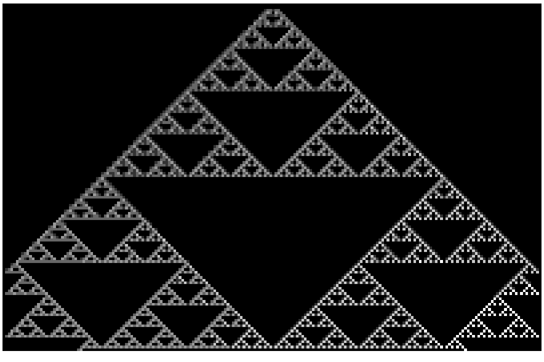
On met ici en évidence les trois propriétés fondamentales des automates cellulaires « standards » [1] :

1. *Le parallélisme* : Un système est dit parallèle si ses constituants évoluent simultanément et de manière indépendante.
2. *La proximité* (locality) : Le nouvel état d'une cellule ne dépend que de son état actuel et de l'état du voisinage immédiat.
3. *L'homogénéité* : Les lois sont universelles, c'est-à-dire communes à l'ensemble de l'espace de l'automate.

C- Les autres types d'Automates Cellulaires

Le Jeu de la vie n'est qu'un type d'automate cellulaire parmi une infinité. Il est en effet possible de jouer sur l'ensemble des règles qui régissent l'univers de l'automate cellulaire.

Le paramètre le plus évident est le nombre de dimensions. Rien n'oblige en effet à considérer des environnements à deux dimensions. L'analyse théorique des automates cellulaires s'est essentiellement effectuée à partir d'automates à une dimension. En réduisant le nombre de dimensions, on limite l'explosion combinatoire, donc le nombre d'automates possibles. Si l'on considère le cas simple d'un voisinage de trois cellules, soit la cellule concernée et ses voisines de droite et de gauche, dans un automate à une dimension et deux états, il n'existe que 2 puissance $2^3 = 256$ règles possibles. La représentation des automates à une dimension (soit une ligne), utilise la seconde dimension pour représenter le temps. À chaque génération, une nouvelle ligne est ajoutée au-dessous de la précédente, on peut visualiser ainsi la dynamique de ce type d'automate.



Exemple d'automate à une dimension (Triangle de Pascal)

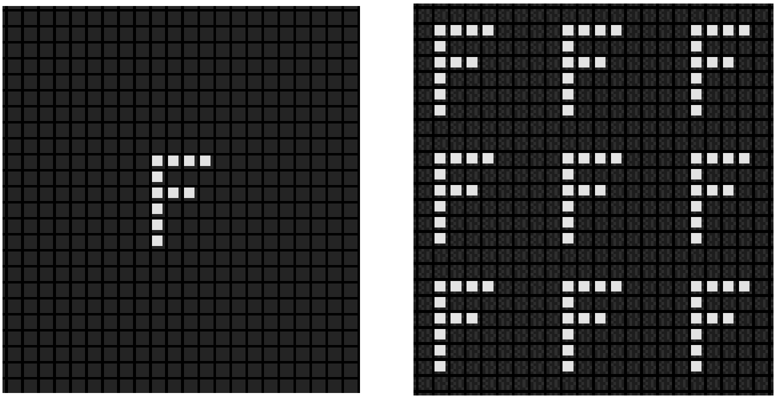
Il est naturellement possible de créer des automates à trois dimensions voire plus.

1. Rucker R., Walker J., *Introduction to CelLab,* http://www.fourmilab.ch/cellab/

Il est également possible de jouer sur la détermination du voisinage. Si l'on considère les automates à deux dimensions, les voisinages les plus courants sont [1] :

- *Von Neumann* : on considère les seuls voisins Nord/Sud/Est/Ouest.
- *Moore* : on ajoute les diagonales. C'est le cas du Jeu de la vie.
- *Moore étendu* : on étend la distance de voisinage au-delà de un.
- *Margolus* : on considère des ensembles de 2x2 éventuellement alternés. C'est ce type de voisinage qui est utilisé dans la simulation du comportement des gaz.

Par exemple, l'automate de Fredkin qui utilise un voisinage de Moore est basé sur la parité du voisinage. C'est un automate de type *sommatif*, c'est-à-dire que l'état des cellules dépend du nombre de voisins actifs, indépendamment de leur position. En l'occurrence, il n'y a reproduction que si la valeur de voisinage est impaire. Cet automate a la propriété remarquable de reproduire toute configuration de base en neuf exemplaires. La règle de Fredkin est généralisable à plus de deux dimensions.

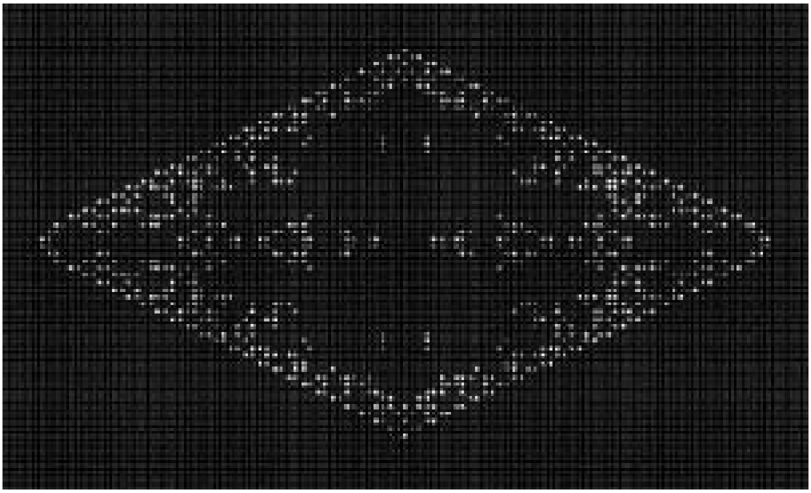


Fredkin génération 0 et Fredkin génération 8

Il est également possible de jouer sur le nombre d'états. Rien n'oblige en effet à se cantonner aux deux états vie/mort. *Brian's Brain* par exemple, présenté par Brian Silverman en 1984 utilise trois états (vie/fantôme/mort) pour engendrer une grande diversité de planeurs complexes au sein de configurations graphiques étonnantes.

---

1. Shatten A., *Cellular Automata,* Institute of General Chemistry Vienna University of Technology, Austria, 1997.



Brian's Brain

Des règles plus complexes sont imaginables. On peut par exemple construire des automates stochastiques dont les règles de transition intègrent une fonction de probabilité.

D'une manière générale, on peut construire tout type d'automate en jouant sur les règles *structurelles* et *fonctionnelles*. Les premières définissent la structure spatiale du réseau d'automates, soit son nombre de dimensions, le mode d'arrangement des cellules (carré, hexagonal... dans un automate à deux dimensions) et le mode de détermination du voisinage. Les secondes déterminent le nombre d'états et les règles de transition [1]. Le choix de ces deux types de règles permet de construire un univers adapté à l'objectif recherché.

D- Les applications pratiques

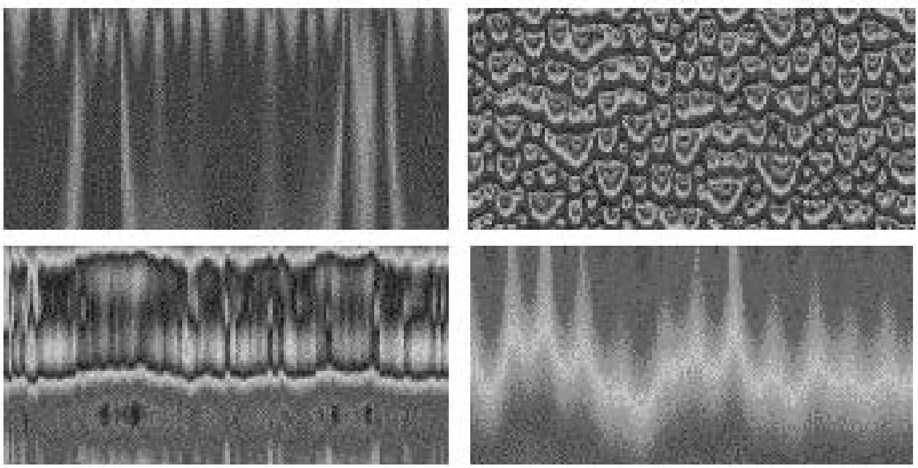
Les applications pratiques des automates cellulaires sont nombreuses et diverses. Fondamentalement ils constituent des univers dont on fixe les lois. Notre Univers est soumis aux lois de la Physique. Ces lois ne sont que partiellement connues et apparaissent hautement complexes. Dans un automate cellulaire, les lois sont simples et complètement connues. On peut ainsi tester et analyser le comportement global d'un univers simplifié. Voici quelques exemples d'application :

- Simulation du comportement d'un gaz. Un gaz est composé d'un ensemble de molécules dont le comportement est fonction de celui des molécules voisines.

1. Langlois A., Phipps M., *Automates cellulaires. Application à la simulation urbaine*, Hermès, 1997, pp. 17 et suivantes.

- Étude des matériaux magnétiques selon le modèle d'Ising : ce modèle (1925) représente le matériau à partir d'un réseau dont chaque noeud est dans un état magnétique donné. Cet état — en l'occurrence l'une des deux orientations du moment magnétique — dépend de l'état des noeuds voisins.
- Simulation des processus de percolation.
- Dans un domaine différent, les automates cellulaires peuvent être utilisés comme alternative aux équations différentielles [1].
- Conception d'ordinateurs massivement parallèles.
- Simulation et étude du développement urbain [2].
- Simulation des processus de cristallisation.
- Simulation de la propagation des feux de forêt.

Dans un domaine plus quotidien, les automates cellulaires peuvent être utilisés comme générateur graphique [3]. Les quelques figures ci-dessous, construites avec Capow [4] montrent certains effets graphiques.



1. Toffoli T., *Cellular automata as an alternative to Differential equations, in Modelling Physics*, Physica 10D, 1984.
2. Langlois A., Phipps M., *idem*.
3. Selon Rucker et Walker *op. cit.*, dans quelques années on ne pourra pas regarder la télévision une heure sans voir un automate cellulaire sous une forme ou une autre.
4. http://www.cs.sjsu.edu/faculty/rucker/capow/

E-Émergences, autoréplication et complexité

1- Émergences

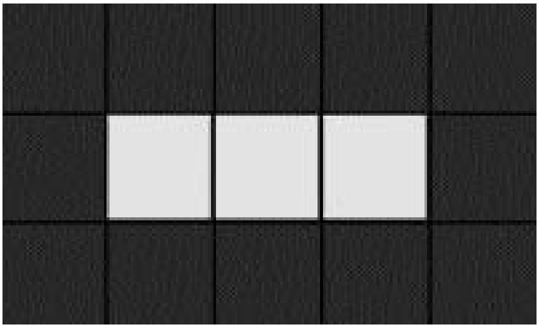
À la base du concept d'émergence on trouve l'idée commune selon laquelle : « le tout est plus que la somme des parties. » La notion d'émergence est ainsi liée à la non-linéarité en ce qu'un processus émergent ne respecte pas le principe de superposition.

« On peut appeler émergence les qualités ou propriétés d'un système qui présentent un caractère de nouveauté par rapport aux qualités ou propriétés des composants considérés isolément ou agencés différemment dans un autre type de système [1]. » L'association complexe d'éléments induit l'apparition de phénomènes, de mécanismes nouveaux. «À chaque niveau (de l'évolution prébiotique, biotique et sociale) émergent des propriétés nouvelles qui ne peuvent être expliquées par la somme des propriétés de chacune des parties qui constituent le tout. Il y a un saut qualitatif (...) La propriété d'émergence est liée à la complexité. L'accroissement de la diversité des éléments, l'accroissement du nombre de liaisons entre ces éléments et le jeu des interactions non linéaires conduisent à des comportements difficilement prédictibles [2]. » Les émergences dites « globales » caractérisent donc les propriétés d'un système qui sont nouvelles par rapport aux propriétés de ses composants isolés ou organisés de manière différente. La vie en fait indéniablement partie [3].

Les processus émergents sont généralement fondées sur la multiplication des interactions parallèles entre éléments indépendants. Les automates cellulaires fonctionnent précisément selon ce principe. Ils consituent ainsi un outil précieux d'analyse de l'émergence.

On a examiné plus haut le comportement d'une ligne de trois cellules verticales : à la première génération on obtient trois cellules horizontales et à la seconde de nouveau trois cellules verticales, etc. Une ligne de trois cellules vivantes engendre donc un cycle.

1. Morin E.,*La Méthode. I-La Nature de la Nature.*, Points, Seuil, Paris 1977 , p. 106.
2. Rosnay (de) J., *Le macroscope. Vers une vision globale.* Points, Seuil, Paris, 1975, pp.131-132.
3. Morin E., *idem*, p. 107.

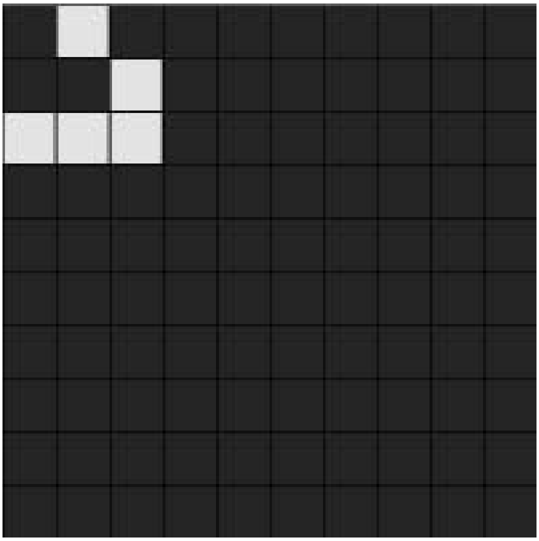


Animation d'un clignotant

Cette figure appartient à la catégorie des « clignotants » (*blinker*) ou oscillateurs. Un oscillateur n'est pas constitué d'un groupe de cellules données, c'est une configuration *dynamique* au sein de l'espace de l'automate cellulaire. Le clignotant semble être autonome, il est une structure spécifique, particulière au sein de son milieu.

D'une manière générale, les règles du Jeu de la vie ont été fixées de façon à engendrer une grande diversité de structures imprévisibles. Les spécialistes ont recensé toute une faune de configurations aux comportements plus étonnants les uns que les autres. Des bibliothèques entières sont disponibles [1]. L'une des plus fameuses est le « planeur » (*glider*) qui apparaît souvent après un remplissage aléatoire. Une configuration donnée de cinq cellules se réplique toutes les quatre générations à une cellule de distance.

1. voir :
http://www.rennard.org/alife/french/liens.html

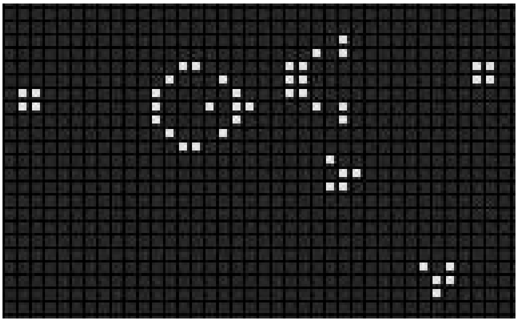


Animation d'un planeur

Plus encore que les oscillateurs, les planeurs évoquent le phénomène d'émergence. On a l'illusion d'un être rampant, parcourant l'espace en ligne droite. Un planeur n'est pas un ensemble de cellules. À chaque génération, les cellules qui le composent sont remplacées. De la même manière que les atomes qui vous constituent ne sont pas ceux dont vous disposiez à votre naissance, les composants du planeur sont perpétuellement renouvelés. L'application des règles du Jeu de la vie fait ainsi apparaître une structure dynamique, cohérente et autonome, ayant des propriétés spécifiques, c'est le caractère même de *l'émergence*. Ces propriétés — en l'occurrence le déplacement — peuvent être utilisées à des fins spécifiques. Le planeur permet de représenter un signal, on en trouve un exemple dans LogiCell [1].

On peut également citer une autre figure remarquable : le canon à planeur (*glider gun*). Il s'agit d'un ensemble de cellules engendrant des planeurs. Il a permis de prouver que la population du Jeu de la vie peut croître indéfiniment. Le classique canon de période 30 est utilisé comme générateur dans LogiCell.

1. http://www.rennard.org/alife/french/logicell.html.



Le canon à planeur

2- Autoréplication

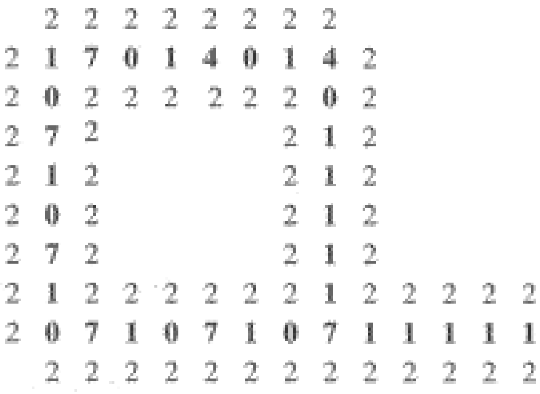
Avec le kinématon rencontré plus haut, von Neumann a essayé de rendre compte des conditions de l'autoréplication. Il se posait plus précisément la question de l'organisation logique d'un automate suffisante pour assurer l'autoréplication [1]. Face à l'impossibilité physique de réaliser cette machine, on a vu que von Neumann s'est tourné vers les automates cellulaires pour construire son automate autoréplicateur. Cet automate était extrêmement complexe car il intégrait un constructeur universel. En 1968, Edgar Codd a proposé une version simplifiée de l'automate de von Neumann n'utilisant que huit états, mais là encore, Codd intégrait un constructeur universel. Les choses ont changé dans les années 1980 avec Christopher Langton.

Langton a considéré que l'étude des systèmes vivants au sein d'un calculateur nécessitait de considérer les seuls éléments *nécessaires* et non les éléments *suffisants* [2]. Il a ainsi abandonné l'idée d'universalité du réplicateur.

L'idée de base de Langton est qu'il est possible de concevoir un automate cellulaire supportant une structure dont les composants constituent l'information nécessaire à sa propre réplication. Cette structure est donc à la fois elle-même et représentation d'elle-même.

L'automate de Langton [3] utilise huit états et vingt-neuf règles. La structure qui se réplique est une boucle constituée d'une « membrane » au sein de laquelle circule l'information nécessaire à la réplication.

1. Adami Ch., *Introduction to Artificial Life*, Springer-Verlag, New-York, 1998, p. 27.
2. Adami Ch., *idem*, p. 27.
3. Langton C.G., Studying Artificial Life with cellular automata, *Physica* D 22, 1986.

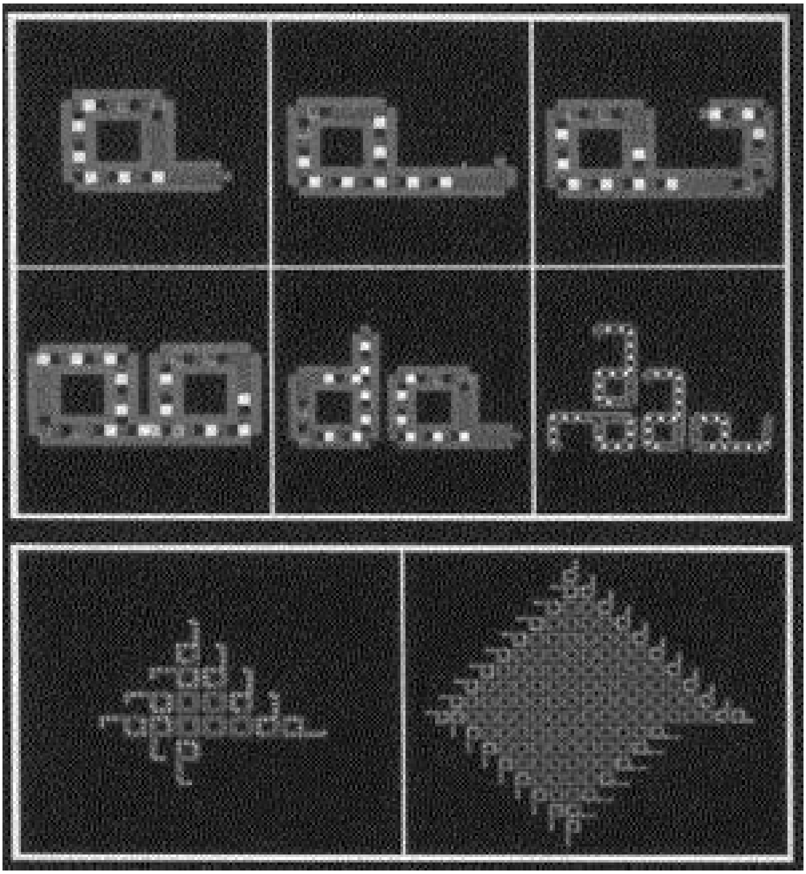


La boucle de Langton

Les cellules à l'état 2 forment la membrane, les cellules internes contiennent l'information de réplication. D'une certaine manière, elles sont l'ADN de la boucle. Les séquences 7-0 et 4-0 se propagent vers la queue. Quand elles atteignent l'extrémité, les premières prolongent la queue, les secondes construisent un angle droit vers la gauche [1].

L'ajout d'une règle de « stérilisation » qui bloque l'évolution au bout d'un certain nombre de générations permet la cristallisation des boucles les plus anciennes et amène à la construction d'une sorte de corail.

1. Langton C., Artificial Life *in The philosophy of Artificial Life,* Boden M. A. dir., Oxford readings in Philosophy, Oxford University Press, 1996, pp. 64 et suivantes.



D'après S. Levy, *Artificial Life.*, Penguin, 1992.
Les boucles de Langton

Les boucles de Langton, comme l'automate de von Neumann montrent que : « (…) l'une des propriétés fondamentales des organismes vivants, l'autoreproduction, est explicable en termes d'interactions d'éléments simples et qu'elle peut être étudiée dans ses principes logiques indépendamment de sa réalisation physique [1]. »

En aucune manière, les boucles de Langton ne peuvent être considérées comme « vivantes », elles ne sont qu'une construction autoréplicatrice limitée.

1. Heudin JC., *La Vie…*, *idem*, p. 54.

3- Chaos et complexité

Le nombre d'univers possibles est virtuellement infini. Dans ce contexte, Wolfram s'est interrogé sur l'existence de règles générales de comportement des automates cellulaires [1].

S.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 éliminent 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.

Cette étude a montré que, selon l'auteur, de nombreux automates cellulaires (peut-être tous) s'intègrent dans quatre classes principales :

1. Classe I- L'évolution conduit à des configurations homogènes.

Un automate de classe I (règle 36)

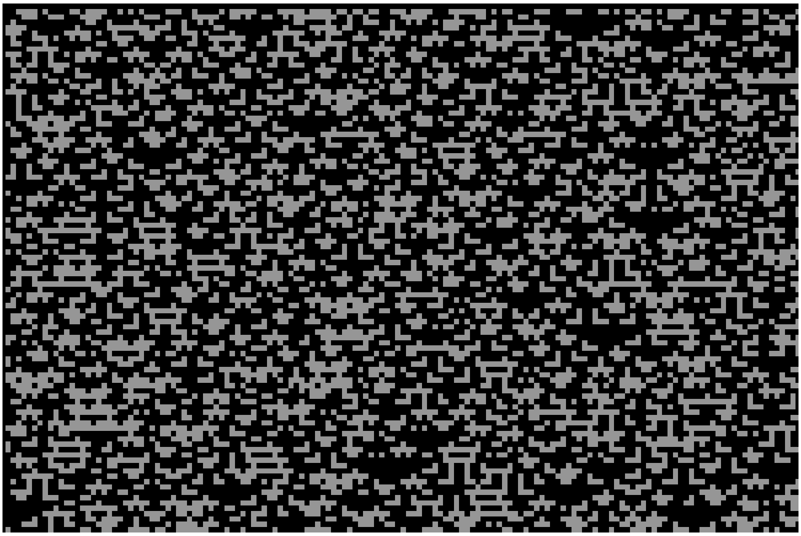
2. Classe II- L'évolution conduit à des structures simples ou périodiques.

---

1. Wolfram S., Universality and complexity in cellular automata, *Physica D*, 10:1-35, 1984. Ce texte est disponible à : http://www.stephenwolfram.com/publications/articles/ca/84-universality/index.html

Un automate de classe II (règle 40)

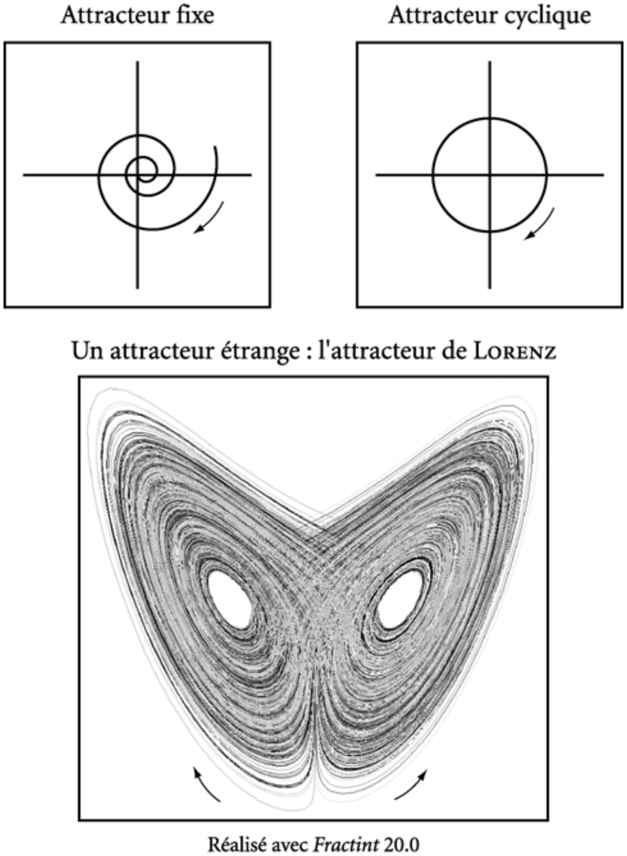
3. Classe III- L'évolution conduit à des configurations chaotiques.



Un automate de classe III (règle 18)

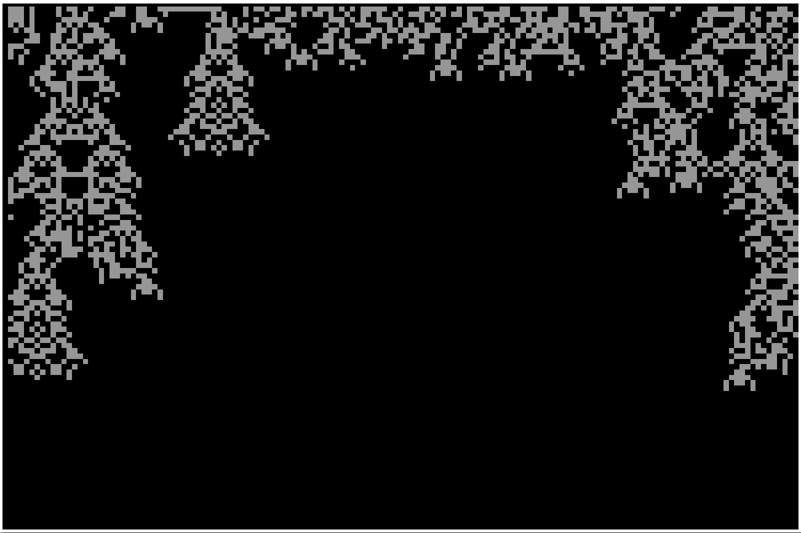
Ces trois classes peuvent être liées à des comportements physiques connus que l'auteur présente en termes d'*attracteurs* dans l'espace des phases. Un tel espace est utilisé pour représenter la dynamique d'un système. Chacun des points d'une représentation graphique figure les états du système en fonction du temps. Par exemple, le mouvement d'un pendule sans frottement sera représenté par un cercle décrivant son caractère cyclique. Si l'on considère un pendule réel (c'est-à-dire soumis aux frottements) la trajectoire sera une spirale rejoignant progressivement le centre de la figure, soit le point représentant la position d'arrêt. Ce point, comme le cercle, est un attracteur, il correspond à la trajectoire du système stabilisé. On connaît depuis longtemps l'attracteur fixe où la stabilisation correspond à l'arrêt, ainsi que l'attracteur cyclique. Dans ce dernier cas, le système répète en permanence le même mouvement (votre cœur tant que vous êtes en vie par exemple), on obtient alors une figure plus ou moins circulaire, mais dans tout les cas bouclant sur elle-même. Plus récemment, en 1963, une nouvelle forme d'attracteur à été découverte : l'*attracteur de LORENZ* [1] généralisé sous la forme des *attracteurs étranges*. Ce type de représentation dans l'espace des phases correspond aux systèmes chaotiques. La complexité des figures engendrées y évoque clairement la sensibilité aux conditions initiales.

1. Edward N. LORENZ était un météorologiste américain. Il a montré en 1963 que le comportement de l'atmosphère est extrêmement sensible aux conditions initiales (le célèbre effet papillon) et en conséquence, que la prévision du temps à long terme est impossible. Ces travaux avec notamment la présentation de l'attracteur de LORENZ, sont à l'origine du développement moderne de la théorie du chaos.



Attracteurs

Dans le cas de la classe IV, le parallèle avec des mécanismes connus est beaucoup moins évident. Les automates de cette classe évoluent vers des configurations globales complexes.



Un automate de classe IV (règle 20)

Pour Wolfram, « Les automates cellulaires peuvent être vus comme des ordinateurs dans lesquels les données sont représentées par les configurations initiales, et traitées à travers l'évolution temporelle. Le calcul universel [dans le sens de la machine universelle de Turing] implique que des configurations initiales adéquates peuvent gérer des procédures algorithmiques arbitraire [1]. » Wolfram constate que les automates cellulaires de classe IV engendrent des structures qui rappellent fortement le Jeu de la vie. Or on sait, parce que cela a été réalisé, que ce dernier permet de construire une machine universelle de Turing. À partir de là, il pose l'hypothèse selon laquelle cette classe caractérise les automates ayant des capacités de Calcul Universel. Pour que cette capacité émerge, les cellules doivent pouvoir communiquer entre elles et transmettre l'information. Dans les automates de classe I et II, l'interdépendance des cellules est trop forte pour qu'un traitement utile puisse avoir lieu. Les automates de classe III quant à eux se caractérisent par une interdépendance trop faible. Les classes I à III sont les plus fréquentes. Elles représentent 30 des 32 automates de Wolfram. Ce n'est donc que dans une minorité de cas — 2 sur 32 en l'occurrence — que l'on trouve des automates cellulaires de classe IV. Ces automates cellulaires qui sont à la limite entre les classes I et II d'une part et III d'autre part, sont seuls aptes à un traitement éventuel de l'information et sont donc les seuls « intéressants » [2].

C. Langton s'est intéressé lui aussi à l'existence de règles générales de classification des automates cellulaires. Le problème réside dans le nombre d'automates

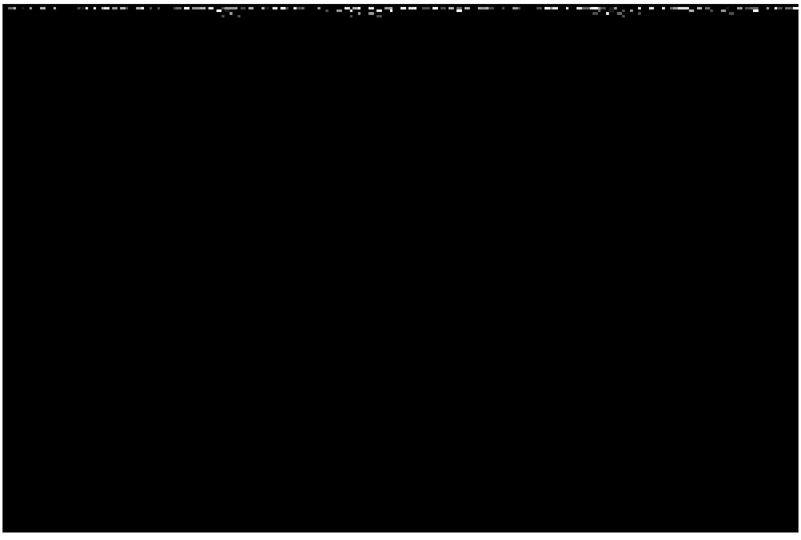
1. Wolfram S., 1984, *Idem.*
2. Gutowitz H.A., Langton C.G., *Methods for designing Cellular Automata with "Interesting" Behavior*, 1994. Disponible à : http://www.santafe.edu/~hag/interesting/interesting.html.

cellulaires possibles. Si l'on considère les seuls automates à une dimension, 8 états et un voisinage de 5, il existe 8 puissance 8^5, soit 8^{32768} (près de 10^{30000}) univers possibles. Langton a décidé de caractériser les automates cellulaires en fonction d'un paramètre général, le *paramètre* λ. λ est en fait la probabilité au sein de toutes les configurations de voisinages possibles, qu'une configuration donnée entraîne la « vie » de la cellule, soit :

1-(nombre de transitions « mortelles »/nombre total de transitions).

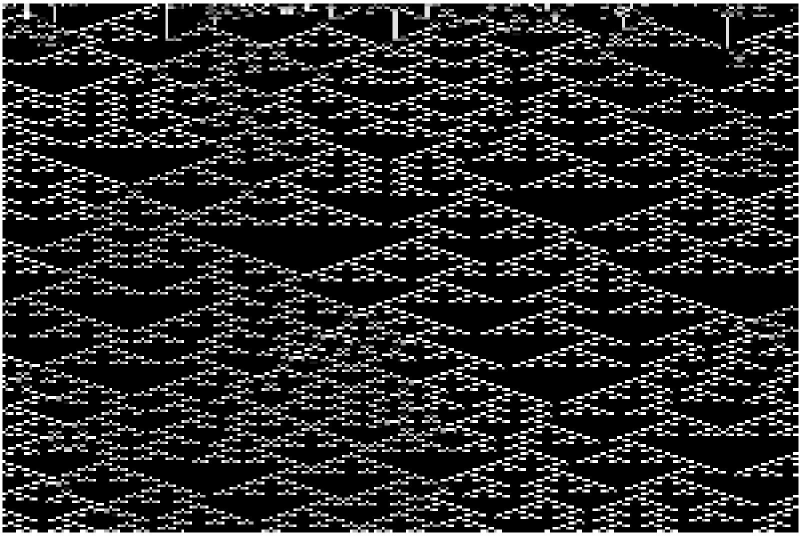
En construisant des règles de transitions à partir de ce paramètre, Langton a pu proposer une classification des automates cellulaires. Pour une valeur faible, les cellules disparaissent rapidement. Si on élève la valeur grossièrement au-dessus de 0,2 on constate l'apparition de structures cycliques ou persistantes. Au dessus de 0,3 des comportements complexes et imprévisibles apparaissent. Enfin, au dessus de 0,5 la multiplication de structures induit un comportement chaotique. D'une certaine manière, le paramètre λ indique la température de l'univers de l'automate cellulaire [1].

Les quatre figures suivantes montrent des exemples d'automates une dimension à huit états avec un voisinage de cinq [2].

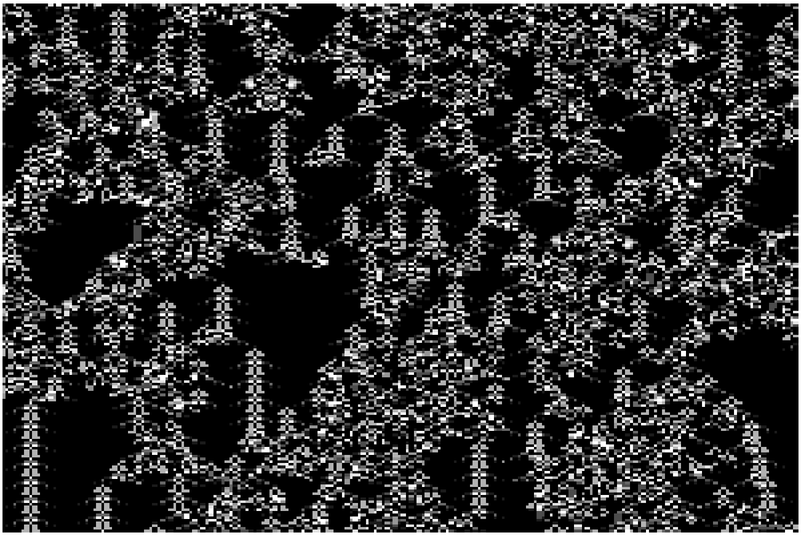


λ = 0.1

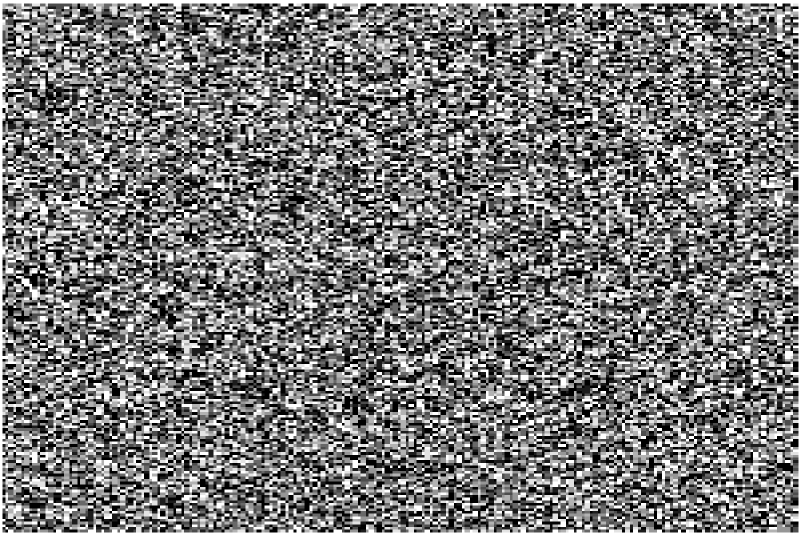
1. Adami, *idem*, pp. 38 et suivantes.
2. Construit avec CAV 2.0 : http://www.rennard.org/alife



$\lambda = 0.25$



$\lambda = 0.45$



$\lambda = \mathbf{0.8}$

On retrouve donc bien chez Langton, mais dans un cadre plus général, la classification de Wolfram. D'après Langton, les automates de classe IV, ceux dont le paramètre se situe entre environ 0.3 et 0.5, sont ceux dont la capacité de transmission de l'information est la plus importante : « (…) les automates cellulaires capables de réaliser des calculs non triviaux — y compris la capacité de Calcul Universel — ont plus de chance de se trouver au voisinage de la transition de phase entre l'ordre et le chaos (…) [1]. » On aurait ainsi la progression suivante dans l'espace des phases :

homogène -> cyclique -> complexe -> chaotique.

J.-C. Heudin [2] utilise un paramètre (β) qui, dans des automates cellulaires à deux dimensions, correspond au nombre de cellules nécessaires pour qu'une cellule reste inchangée. Si l'on prend le cas de Conway, ce paramètre vaut 2. Il redéfinit les automates à partir de quatre règles soit :

R1 : le voisinage est inférieur à β : la cellule meurt.

R2 : une cellule entourée de β cellules vivantes conserve son état.

R3 : une cellule ayant $\beta+1$ voisines vivantes devient vivante.

R4 : une cellule entourée de plus de $\beta+1$ voisines meurt.

Pour $\beta = 1$, les probabilités d'exécution des règles sont : R4>R3>R2>R1. Pour $\beta = 2$, les probabilités s'inversent. On obtient : R1>R2>R3>R4. Au delà de 2, l'ordre reste identique mais les règles R2 à R4 ne s'exécutent que marginalement.

1. Michell M., Hraber P.T., Crutchfield J., *Revisiting the edge of chaos : Evolving Cellular Automate to perform Computations,* Santa Fe Institute, Working Paper 93-03-014, p. 8. Ce texte est disponible à : http://www.santafe.edu/projects/evca/Papers/rev-edge.html.
2. Heudin J.C., *L'évolution..., op. cit.*, pp. 90 et suivantes.

Heudin montre ainsi un changement fondamental dans l'univers des automates cellulaires pour $\beta = 2$. C'est au cours de cette modification profonde des propriétés de l'automate — de cette *transition de phase* — que se manifeste la complexité : « Pour apparaître [le complexe a] besoin d'ordre et d'une pincée de chaos. Cette situation n'est possible qu'à l'interface des deux régimes, à la frontière qui mène au chaos [1]. »

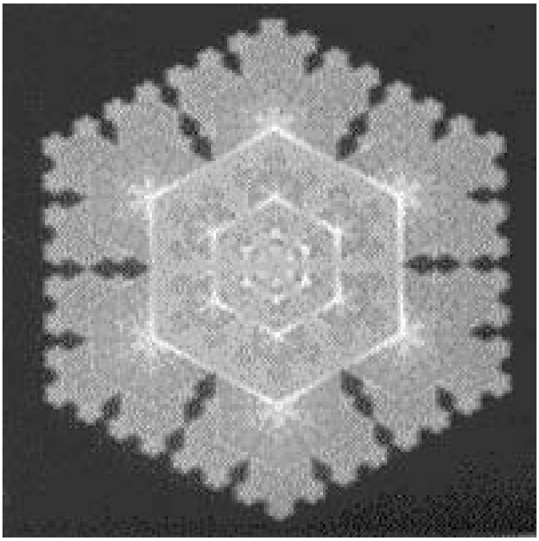
La généralisation des enseignements des automates cellulaires, la diversité des structures universelles ou l'existence de la vie, amènent ainsi à penser que, parmi l'infinité d'univers possibles, les lois de notre Univers sont précisément à la frontière entre l'ordre et le chaos. C'est l'essence de l'approche de Langton dans son expression : « La vie au bord du chaos [2]. »

Conclusion

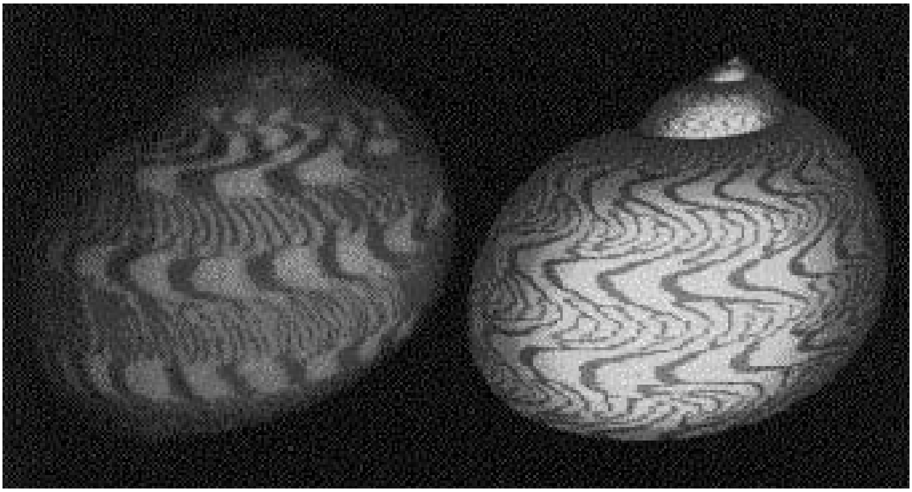
Les automates cellulaires sont des structures abstraites qui permettent d'étudier des univers virtuels dont on maîtrise l'ensemble des lois. Ils contribuent à la connaissance de notre propre Univers : « Ainsi, les systèmes physiques et biologiques complexes peuvent-ils reposer sur les mêmes classes universelles que les modèles mathématiques idéaux fournis par les automates cellulaires. La connaissance du comportement des automates cellulaires peut amener à des résultats plus généraux concernant le comportement des systèmes naturels complexes [3]. »

La capacité de certains automates cellulaires à supporter des machines de Turing, soit leur capacité à construire des structures arbitrairement complexes n'est pas suffisante pour conclure à la possibilité d'apparition de structures « vivantes » au sein de ces univers. De même, la généralisation de certains des comportements des automates cellulaires à notre Univers peut s'avérer hâtive. Toutefois, et en guise de conclusion, je laisse à votre réflexion les deux images suivantes.

1. Heudin J.C, *idem*, p. 98.
2. Langton C.G., Life at the edge of chaos, *Artificial Life II*, Addison-Wesley, 1991.
3. Wolfram S., 1984, *idem*.



D'après S. Levy, *Artificial Life*, Penguin, 1992.
Le flocon de neige de Norman Packard



Langton ed., *Artificial Life an overview,* MIT press, 1997.
La texture d'un vrai coquillage et son équivalent généré par un automate cellulaire

Références

Adami Ch., *Introduction to Artificial Life*, Springer-Verlag, New-York, 1998.
Bertalanffy (von) L., *Théorie générale des systèmes.* Dunod, Paris, 1973.

Gutowitz H.A., Langton C.G., *Methods for designing Cellular Automata with "Interesting" Behavior*, 1994.
Heudin JC, *La Vie Artificielle,* Hermès, Paris, 1994.
Heudin JC, *L'évolution au bord du chaos,* Hermès, Paris, 1998.
Langlois A., Phipps M., *Automates cellulaires. Application à la simulation urbaine.* Hermès, Paris, 1997.
Langton C.G., Studying Artificial Life with cellular automata, *Physica* D 22, 1986.
Langton C.G., Life at the edge of chaos, *Artificial Life II,* Addison-Wesley, 1991.
Langton C., Artificial Life *in The philosophy of Artificial Life,* Boden M. A. dir., Oxford readings in Philosophy, Oxford University Press, 1996.
Langton ed., *Artificial Life an overview,* MIT press, 1997.
Levy S., *Artificial Life. The quest for a new creation,* Penguin, 1992.
Michell M., Hraber P.T., Crutchfield J., *Revisiting the edge of chaos : Evolving Cellular Automate to perform Computations,* Santa Fe Institute, Working Paper 93-03-014.
Morin E., *La Méthode. I-La Nature de la Nature.*, Points, Seuil, Paris 1977.
Rennard J.-Ph., *Vie artificielle. Où la biologie rencontre l'informatique*, Vuibert, 2002.
Rosnay (de) J., *Le macroscope. Vers une vision globale.* Points, Seuil, Paris, 1975.
Rucker R., Walker J., *Introduction to CelLab.* Ce texte est disponible à :
http://www.fourmilab.ch/cellab/
Shatten A., *Cellular Automata,* Institute of General Chemistry Vienna University of Technology, Austria, 1997.
Toffoli T., *Cellular automata as an alternative to Differential equations, in Modelling Physics*, Physica 10D, 1984.
Von Neumann J. et Burks A. ed., *Theory of Self-Reproduction Automata,* University of Illinois Press, 1966.
Wolfram S., Universality and complexity in cellular automata, *Physica D*, 10:1-35, 1984.
Wolfram S., *A New Kind of Science*, Wolfram Media, 2002.

Jean-Philippe Rennard 12/2000
http://www.rennard.org/alife -- alife@rennard.org