

3 - Autoreproduction et Universalité

Automates Cellulaires II

Note : cet extrait a pour objectif de donner un aperçu du chapitre. Les indications de page correspondent à la place dans le chapitre, elles sont là à titre informatif. Ces extraits sont épars, le lecteur peut se référer à la table des matières pour se faire une idée des parties manquantes. La conversion PDF utilise des fichiers bitmaps, la qualité des illustrations s'en ressent.

« Tels sont les faits qui, avec le postulat évident qu'aucun être ne peut créer un autre être supérieur à lui-même, réduisent à néant votre stupide hypothèse ¹. »

Depuis toujours, l'autoreproduction, ce phénomène par lequel un individu parvient à fabriquer un autre lui-même, est considérée comme le propre du vivant. La Vie Artificielle ne peut faire l'économie de l'analyse des mécanismes en jeu. On va voir comment elle est parvenue à montrer que ce processus n'a nul besoin d'être lié au vivant et qu'il relève d'une organisation, d'une structure indépendante du médium considéré et s'inscrivant dans une classe particulière de lois universelles.

1. ASIMOV I, *Le grand livre des robots*, Paris, Omnibus 1990, p. 220.

Souvenez vous, c'était au début des années 1980...

Europe, second satellite de Jupiter découvert par GALILÉE en 1610. Planète de glace, océan errant autour de la géante gazeuse. La surface en est quasi uniformément blanche, parcourue d'une multitude de sillons et crevasses. Dans les profondeurs de l'océan unique, la température s'élève, conséquence des mouvements tectoniques induits par l'effet de marée de Jupiter. Là, des créatures élémentaires s'agitent à la recherche de sources d'énergie assimilable.

Les *Entités* ont découvert ces formes de vie. Elles savent que si les conditions étaient un peu plus favorables, la conscience et l'intelligence — les joyaux de l'Univers — pourraient apparaître sur cette planète. L'idée vient alors : puisque Jupiter est parfois considérée comme une protoétoile, pourquoi ne pas la transformer en étoile vraie ? La glace d'Europe pourra alors fondre et les créatures bénéficier d'un environnement favorable à une évolution rapide et féconde. C'est là une tâche gigantesque, même pour les *Entités*. La solution retenue n'en est pas moins simple dans son principe. Une « machine » est envoyée dans l'atmosphère de Jupiter. Elle en tire les ressources nécessaires à la construction d'une « fille » qui en fait de même, etc... Par le jeu induit de la croissance exponentielle, les machines sont rapidement suffisamment nombreuses pour réaliser l'immense tâche qui leur a été confiée.

Cette adaptation libre de « 2010 : Odyssée deux ¹ » présente l'un des plus célèbres exemples de machines autoreproductrices, de ce que l'on appelle des *machines de VON NEUMANN*.

La capacité d'autoreproduction est au cœur du vivant. Quand on cherche à définir la vie, c'est d'abord à la propriété d'autoreproduction que l'on se réfère (voir le chapitre "Vie et Vie Artificielle", page 1). La Vie Artificielle ne peut donc faire l'économie d'une analyse des mécanismes et concepts fondamentaux mis en œuvre au cours de ce processus. On verra ensuite comment la propriété dite « d'universalité » peut être liée aux mécanismes de l'autoreproduction et conduire à une interprétation particulière des lois de notre univers.

page 5

Le Kinématon

John VON NEUMANN a écrit en 1948 une *Théorie générale et logique des automates*². Il s'intéressait alors explicitement à la reproduction biologique. La

1. CLARKE A.C., *2010 : Odyssée deux*, Paris, Albin Michel, 1983. En fait, il existe deux modèles de la structure interne d'Europe. Dans le premier, on trouverait sous la banquise une couche de quelques kilomètres de glaces plastiques animée de mouvements convectifs. Dans le second, il y aurait une couche d'eau liquide d'environ 100 km d'épaisseur. Celle-ci serait la plus probable.

question était : comment décrire un système (un automate) capable de produire des répliques de lui-même, capable de s'autoreproduire ?

Le risque est important quand on traite de l'autoreproduction de considérer des phénomènes « triviaux ». Ces phénomènes sont fréquents. La multiplication des configurations triangulaires dans le *Triangle de Pascal* (Figure 2.17) en est un exemple, le fonctionnement de l'automate de FREDKIN (Figure 2.20) en est un autre. De même, la réplication de l'ADN qui repose mécaniquement sur le jeu de règles physiques et chimiques ne relève pas de l'autoreproduction « vraie ». Pour éviter cet écueil, VON NEUMANN a pris le parti de ne considérer que des reproducteurs universels, c'est-à-dire capables de réaliser toute construction dont la description leur est fournie. Dans ce contexte, l'autoreproduction devient le cas particulier où l'on fournit à la machine une description d'elle-même.

Le second problème qu'il a dû affronter est celui de la complexité. Comment une machine peut-elle produire quelque chose d'aussi compliquée qu'elle-même ? En effet, la machine « productrice » doit alors contenir une description complète de la machine à construire *plus* divers instruments d'interprétation et de fabrication. Dans ce cas, le produit fini est nécessairement plus simple que le producteur. C'est d'ailleurs clairement ce que l'intuition nous dicte comme en témoigne l'exergue d'ASIMOV en début de chapitre. Pourtant, la moindre des bactéries est capable de produire quelque chose d'aussi compliqué qu'elle-même. Pour résoudre ce problème fondamental, von Neumann a fait appel aux machines universelles de TURING. On a vu qu'une telle machine est capable d'interpréter toute description d'une autre machine qui peut lui être fournie. On peut donc lui donner une description d'une complexité quelconque, elle saura en faire l'interprétation. VON NEUMANN propose ainsi une forme particulière de machine de TURING. Son automate n'est pas limité au seul calcul, à l'édition d'une bande de papier, il a une capacité d'action sur son environnement et est apte à fabriquer d'autres automates. Fondamentalement, cela ne change rien au principe de la machine de TURING.

Imaginez une sorte de robot aux formes bizarres et complexes flottant dans un lac où surnagent d'innombrables composants robotiques. Des bras s'échappent, ramènent un élément, le fixent à un autre et, progressivement, laborieusement, le robot construit son jumeau¹. VON NEUMANN propose de concevoir ce robot à partir d'un automate composite, formé de plusieurs automates dédiés.

page 13

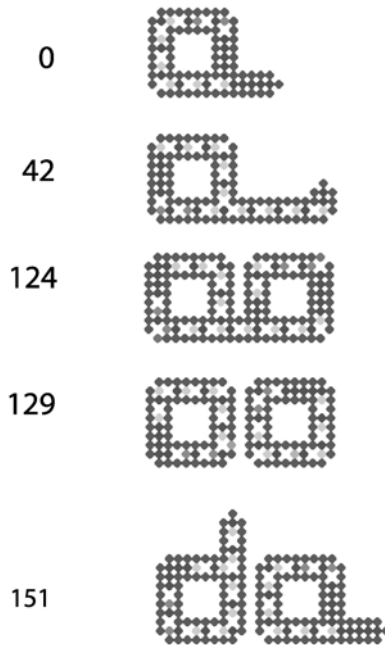
2. VON NEUMANN J., « The General and Logical Theory of Automata », in *Cerebral Mechanisms in Behavior*, New-York,, John WILEY and Sons, 1951. Ce texte est reproduit dans VON NEUMANN J., CHAZAL G., *Théorie Générale et logique des automates*, Seyssel, Champ Vallon, 1996.

1. ou tout autre automate d'une complexité quelconque.

Au cours du fonctionnement de la boucle de LANGTON, on assiste à la construction progressive d'une nouvelle boucle qui, lorsqu'elle se referme sur elle-même coupe le « cordon ombilical » qui la relie à sa « mère » (Figure 3.1). La reproduction complète de la boucle d'origine nécessite 151 générations.

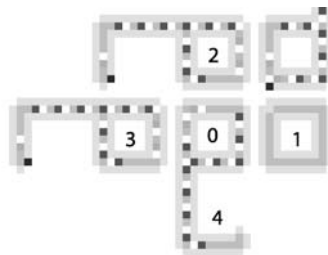
Figure 3.1 : La construction des boucles de LANGTON

Génération



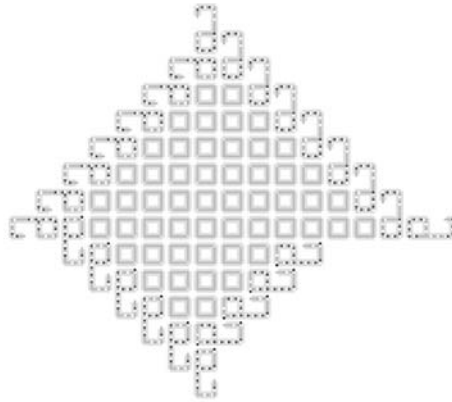
La boucle étant symétrique, quand elle a construit sa fille de droite les instructions se répètent à 90 degrés et elle construit une copie au-dessus d'elle-même puis à sa gauche avant de terminer au-dessous (Figure 3.2).

Figure 3.2 : L'ordre de construction des boucles de LANGTON



Enfin, une règle particulière « gèle » la boucle quand elle ne dispose plus de l'espace nécessaire à son extension. On aboutit ainsi à la construction d'une sorte de « corail » qui prend progressivement possession de l'ensemble de l'espace disponible.

Figure 3.3 : Formation du « corail » des boucles de LANGTON



Bien que critiquée (la confusion entre configuration et espace peut poser des problèmes d'interprétation¹) la boucle de LANGTON est devenue le symbole de la Vie Artificielle. Elle montre dans un cadre d'une grande simplicité que les mécanismes de l'autoreproduction reposent sur une *organisation*, un *processus*, indépendant du médium : « Les automates autoreproducteurs de John VON NEUMANN et de Christopher LANGTON (...) démontrent 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 physique². » L'autoreproduction est donc un « fait d'organisation » elle est indépendante du médium considéré.

page 16

Universalité et Automates Cellulaires

On a pu voir que d'une manière générale, l'*universalité des capacités de calcul* (qu'on résumera simplement à universalité par la suite) au sens de la machine universelle de TURING, est au centre des premiers raisonnements de VON NEUMANN concernant l'autoreproduction. Plus encore, la version forte de la thèse de

1. OSTOLAZA J.F., BERGARECHE A.M., *ibid.*, p. 56..

2. HEUDIN JC, *La Vie artificielle*, Paris, Hermès, 1994, p. 54.

CHURCH-TURING (cf. page 25) amène à penser que l'universalité peut être au cœur de l'émergence des processus vivants. Dans ce contexte, la question peut se poser de la recherche des conditions physiques qui potentiellement sont grosses de structures ayant la propriété d'universalité. Pourquoi, dans notre univers, des structures vivantes ont-elles pu apparaître ? D'une manière générale, existe-t-il un type de loi universelle favorisant l'émergence de systèmes autoreproducteurs, voire de la vie ? Cette question a été abordée, d'abord indirectement, au cours de l'étude des propriétés générales des automates cellulaires.

L'universalité dans le Jeu de la Vie

Afin de mieux comprendre ce que peut être l'universalité d'un automate cellulaire, on va en présenter un exemple simple (mais partiel) dans le cadre du Jeu de la Vie.

page 31

La classification de LANGTON

À la suite de S. WOLFRAM, Christopher LANGTON s'est intéressé au comportement général des automates cellulaires. Dans quelle mesure ces automates sont-ils capables de jouer le rôle des molécules biochimiques¹ ? LANGTON cherchait ici à insister sur l'indépendance vis-à-vis du support physique des propriétés du vivant. Question reformulée plus tard sous la forme suivante : « Sous quelles conditions les systèmes physiques peuvent-ils supporter les opérations de transmission, stockage et modification de l'information qui constituent la capacité de calcul² ? », problème trop complexe en soi et réduit par l'auteur aux seuls univers des automates cellulaires.

LANGTON a proposé une démarche paramétrique avec le paramètre λ . Pour un automate à K états dont le voisinage est de N cellules, on a K^N configurations de voisinage possibles. Si l'on considère l'ensemble des états possibles d'un automate, l'un de ces états sera considéré comme l'état « repos » (soit l'état 0 en règle générale). Pour chacune des K^N configurations de voisinage, la fonction de transition peut conduire soit à l'état repos, soit à l'un des $K-1$ états restants. Si l'on appelle n le nombre de transitions vers l'état repos, on a :

-
1. LANGTON S., « Studying Artificial Life with Cellular Automata », *Physica D*, 22, 1986, pp. 120-149.
 2. LANGTON S., « Computation at the Edge of Chaos : Phase Transition and Emergent Computation », *Physica D*, 42, 1990, p. 12-37.

$$\lambda = \frac{K^N - n}{K^N}$$

Le paramètre λ est le rapport entre le nombre de configurations de voisinage qui conduisent à un état actif et le total des configurations possibles. Il mesure donc la probabilité qu'une configuration de voisinage donnée engendre un état actif. En cas d'homogénéité absolue, par exemple si toutes les règles de transition mènent à l'état repos ($n=K^N$), on a $\lambda = 0$, inversement si les probabilités de transition vers chacun des états sont égales on a $\lambda = 1 - 1/K$. Le paramètre vaut évidemment 1 si $n=0$.

LANGTON considère les automates à une dimension ayant au moins 4 états et un voisinage minimum de 5 (soit au moins 1024 configurations de voisinage possibles). En outre ses automates sont symétriques ("100" donne le même résultat que "001") et toute configuration de voisinage constituée de cellules dans un état unique devra conduire à ce même état. On rejoint ainsi les conditions de *validité* de WOLFRAM.

L'utilisation du paramètre λ permet de construire directement un automate donné. Il suffit par exemple de tirer les résultats de chacune des configurations de voisinage au hasard avec une probabilité $1 - \lambda$ d'obtenir l'état de repos. Sur cette base, LANGTON a pu étudier le comportement de nombreux automates construits en fonction de son paramètre et parcourir ainsi le spectre des valeurs couvertes par λ pour un automate à quatre états et un voisinage de cinq (2 cellules à droite et à gauche plus la cellule centrale).

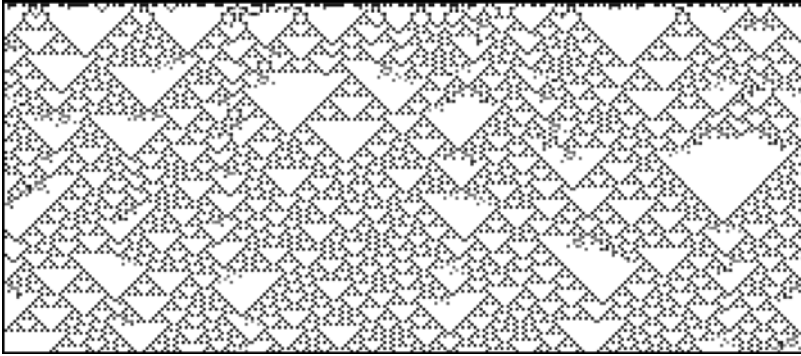
Pour une valeur faible de λ , soit grossièrement moins de 0,2 on assiste à une disparition rapide des cellules actives (Figure 3.4).

Figure 3.4 : Un automate de LANGTON pour Lambda=0,1



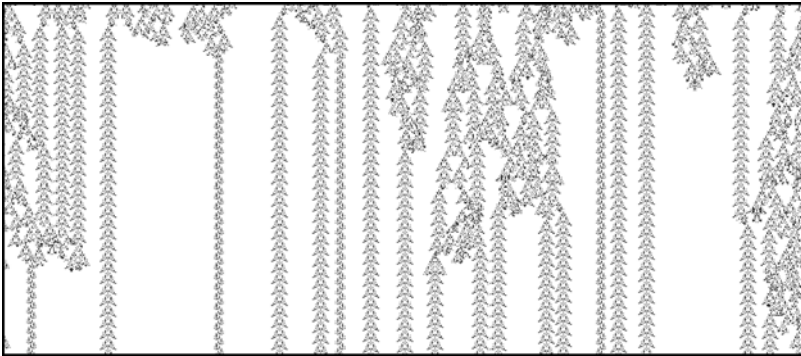
Ce type de comportement rappelle évidemment la classe I de WOLFRAM. Si l'on augmente la valeur du paramètre, on obtient des configurations cycliques (Figure 3.5).

Figure 3.5 : Un automate de LANGTON pour $\text{Lambda}=0,25$

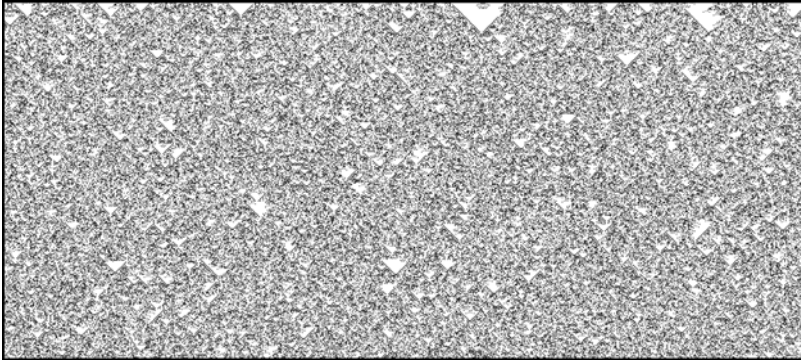


Pour cette valeur de paramètre, on retrouve la classe II de Wolfram. Pour des valeurs intermédiaires, soit grossièrement entre 0,3 et 0,5, on obtient des comportements *complexes* (Figure 3.6).

Figure 3.6 : Un automate de LANGTON pour $\text{Lambda}=0,4$



Les transitoires (soit la suite de configurations précédant la disparition éventuelle) sont très longues voire infinies et les configurations imprévisibles. On retrouve la fameuse classe IV de WOLFRAM. Enfin, quand la valeur de λ dépasse environ 0,5, on obtient des structures apériodiques, chaotiques (Figure 3.7).

Figure 3.7 : Un automate de LANGTON pour $\lambda=0,55$ 

La correspondance avec la classe III de WOLFRAM est directe.

Au final, LANGTON relève trois grands types d'automates conduisant aux comportements suivants :

- des configurations homogènes ;
- des configurations chaotiques ;
- des configurations complexes.

Il met ainsi en évidence la séquence suivante dans l'espace des phases :

Point fixe > Cyclique > Complexe > Chaotique¹.

« D'une certaine manière, le paramètre λ semble fixer la température du monde computationnel². » L'analyse des différents automates, notamment en termes d'entropie simple et mutuelle des cellules, amène LANGTON à considérer que les automates appartenant à la « classe complexe » sont les plus aptes à traiter l'information. Dans les autres cas, l'influence réciproque des cellules est soit trop forte, soit trop faible. Seuls les automates qui se trouvent entre ces deux extrêmes sont susceptibles d'être universels. Il se produirait à cette frontière entre ordre et chaos une *transition de phase*. Ce serait au cours de cette transition, de ce passage entre ordre et désordre que se produiraient les phénomènes « intéressants³ » : « (...) les automates cellulaires capables de réaliser des calculs non triviaux — y compris les automates universels — ont plus de chance de se trouver au voisinage de la transition de phase entre ordre et chaos (...)⁴. » Les conséquences en seraient essentielles :

1. C'est en constatant que le « chaos » vient après le « complexe » que LANGTON complète l'approche de VON NEUMANN en considérant que la complexité est dégénérative au-delà d'un certain seuil.

2. ADAMI C., *Introduction to Artificial Life*, Springer-Verlag, 1998, p. 39.

3. GUTOWITZ H.A., LANGTON C.G., *Methods for designing Cellular Automata with "Interesting" Behavior*, <http://www.santafe.edu/~hag/interesting/interesting.html>.

4. MITCHELL M., HRABER P.T., CRUTCHFIELD J.P., *Revisiting the Edge of Chaos : Evolving Cellular Automata to Perform Computations*, SFI Working Paper 93-03-014, 1993.

« Une des conséquences les plus excitantes de ce point de vue est que la vie trouve son origine dans ce type de transitoires dynamiques étendues. (...) Le point de vue présenté ici suggère que nous-mêmes sommes des exemples de cette sorte de “calcul” qui peut émerger au voisinage de la transition de phase si le temps est suffisant. (...) [ces] systèmes transitoires doivent avoir découvert comment utiliser leur propre capacité de traitement de l’information de façon à sentir et répondre à leur environnement local. L’évolution a été le processus grâce auquel de tels systèmes sont parvenus à gagner le contrôle local d’un nombre croissant de variables environnementales, affectant leur capacité à se maintenir eux-mêmes sur des transitoires étendues avec un avenir essentiellement ouvert ¹. »

page 35

Ces travaux, comme ceux de LANGTON et WOLFRAM suggèrent ainsi que parmi l’infinité d’univers possible, notre Univers se trouverait précisément à la transition de phase entre ordre et chaos. Si les lois physiques, avec par exemple les grandes constantes fondamentales comme la charge de l’électron ou la masse du proton avaient été un peu différentes, notre univers aurait été incapable de faire émerger des structures complexes pouvant aller jusqu’aux êtres vivants. C’est l’essence de l’expression *la vie au bord du chaos*.

1. LANGTON C., 1990, *ibid.*, p. 35.