

Une brève histoire des automates cellulaires

Nazim Fatès

Attaché temporaire d'enseignement et de recherche à l'université Nancy 1

Ce texte résume la première partie du mémoire de DEA de N. Fatès, Les automates cellulaires. Vers une nouvelle épistémologie ?, Université Paris I Sorbonne, 2001.

Comme c'est souvent le cas en sciences, c'est en posant des questions audacieuses que l'on ouvre la voie à l'exploration de nouveaux domaines du savoir. La question qui fut posée par J. von Neumann (1903-1957), «Une machine peut-elle s'auto-reproduire ?» mérite une attention toute particulière puisqu'elle est à l'origine d'une grande aventure de l'informatique.

L'automate de von Neumann

Suite aux recherches menées durant la seconde guerre mondiale, un objectif nouveau voit le jour dans le domaine des sciences et des techniques : construire des machines qui ne sont plus de simples outils passifs mais qui sont douées d'une autonomie qui leur permette d'atteindre des buts programmés par leur utilisateur. Cette nouvelle discipline se nomme *cybernétique* et devient un attrait pour les plus grands savants du moment. C'est dans ce cadre que von Neumann, un des concepteurs des premiers ordinateurs, cherche à savoir s'il est possible de concevoir une machine qui, à l'instar des organismes biologiques, pourrait créer une autre machine de même complexité, voire de complexité supérieure.

Von Neumann chercha tout d'abord à aborder le problème par des moyens techniques : cette machine auto-reproductrice devait puiser dans un bac de composants élémentaires les pièces nécessaires à la fabrication de son double, puis assembler les pièces sans les abîmer et ensuite mettre sous tension la machine-fille, machine qui irait elle-même proliférer en construisant des doubles. Inutile de dire qu'étant donné l'état des techniques d'alors, un tel projet était tout simplement irréalisable. C'est alors qu'un collègue de von Neumann, S. Ulam (1909-1984) lui suggéra de travailler sur un monde plus abstrait dans lequel l'espace sera découpé en cellules et où l'état de chaque cellule symboliserait une partie élémentaire de la machine. L'avantage d'un tel monde est que l'on pouvait s'affranchir des contraintes posées par les lois de la physique et ne s'intéresser qu'aux interactions entre composants. L'idée plut à von Neumann qui était habitué à regarder les automates comme des machi-

nes logiques et il adopta ce modèle, qu'on appellerait plus tard un *automate cellulaire* comme base de travail pour la conception d'une machine auto-reproductrice.

La possibilité de travailler dans un espace abstrait où les lois d'interactions pouvaient être modifiées à volonté n'aplanissait pas toutes les difficultés pour autant. Il était en effet important que le mécanisme proposé puisse rendre compte d'une partie de ce qui se produit dans la nature, il ne devait donc pas être «trivial». Pour bien comprendre ce que signifierait une auto-reproduction triviale, et pour saisir l'importance de la règle régissant l'automate cellulaire, considérons l'exemple suivant :

- L'espace est découpé suivant une grille carrée régulière.
- Chaque cellule peut avoir deux états symbolisés par 0 ou 1.
- A chaque étape, une cellule compte le nombre de cellules voisines dans l'état 1 ; si ce nombre est pair, elle prend l'état 0 et si ce nombre est impair, elle prend l'état 1.

On peut montrer que, de façon surprenante, dans un tel espace, toutes les figures quelles que soient leur forme et leur taille finissent par se dupliquer. C'est donc un mauvais exemple de modèle de fonctionnement de l'automate auto-reproducteur.

Von Neumann avait une compréhension profonde des travaux ayant trait à la complexité des automates et notamment ceux d'Alan M. Turing (1912-1954). Un résultat fondamental de ses travaux était que toute opération de calcul formalisée en langage algorithmique pouvait être accomplie par une unique machine abstraite appelée *machine de Turing universelle*. Cette machine réalise des opérations élémentaires de lecture et d'écriture sur un ruban divisé en cases. Il n'était donc pas trop difficile d'inclure une telle machine de Turing universelle dans le monde cellulaire qu'il construisait. De cette façon, les capacités de l'automate auto-reproducteur ne seraient pas limitées à la seule duplication mais il pourrait en outre, avec une programmation adéquate, réaliser diverses tâches qui lui seraient dictées par un jeu d'instructions.

Tous les mathématiciens savent que prouver qu'une solution existe et trouver cette solution de manière effective sont deux tâches qui sont en général d'inégale difficulté. Ainsi l'inclusion d'une machine de Turing, si elle permettait de résoudre le problème de manière théorique, ne faisait qu'augmenter le niveau de difficulté pour trouver les bonnes règles régissant le fonctionnement de l'automate. De fait, le travail de von Neumann s'étala sur plusieurs années et aboutit à une machine logique dont les principaux traits sont les suivants :

- La machine-mère est dotée d'une partie constituant la suite d'instructions qu'elle doit exécuter et d'une partie interprétant ces instructions.
- Les instructions pilotent un bras articulé pouvant se développer ou se rétracter, ce bras construit une machine-fille dans une portion distincte de l'espace.
- Lorsque la machine-mère a terminé de construire la machine-fille, elle duplique son propre jeu d'instructions sans interpréter ces instructions.

Pour ce faire, le plan de la machine auto-reproductrice comportait plus de deux cent mille cellules, chaque cellule pouvant être dans vingt-neuf états différents (un état symbolise le vide et les vingt-huit autres des composants élémentaires de la machine).

On peut parler d'une victoire «à la Pyrrhus» puisque la solution proposée était trop complexe pour être effectivement testée sur un ordinateur de l'époque. Il semble que cela ait déçu von Neumann qui n'achèvera pas son travail et dont les résultats ne seront publiés qu'après sa mort sous l'initiative d'A. Burks, un de ses proches collaborateurs. Avec du recul, pour nous autres «modernes», nous pouvons mieux apprécier cette construction dans la mesure où elle contient déjà en germe un modèle de la génétique. En effet, même si les ressemblances sont limitées, il devient possible de faire une analogie prudente avec le fonctionnement d'une cellule : le jeu d'instructions peut être assimilé à l'ADN, qui, dans les cellules biologiques, est aussi interprété et dupliqué à l'identique.

Où l'histoire ne s'arrête pas là

La recherche sur les automates cellulaires allait alors se poursuivre de manière sporadique avant de connaître un essor subit dans les années soixante-dix. Là encore, c'est une question simple qui est à l'origine de ce mouvement : J. Conway propose le modèle, baptisé *Jeu de la vie* :

- Les cellules sont réparties régulièrement le long d'une grille carrée infinie,
- Chaque cellule peut être dans l'état 0 symbolisant la mort ou dans l'état 1, symbolisant la vie,
- Chaque cellule met à jour son état en fonction des huit cellules adjacentes selon les deux règles suivantes :
 - (a) règle de naissance : une cellule passe de l'état 0 à

l'état 1 si et seulement si elle possède trois voisines dans l'état 1 ;

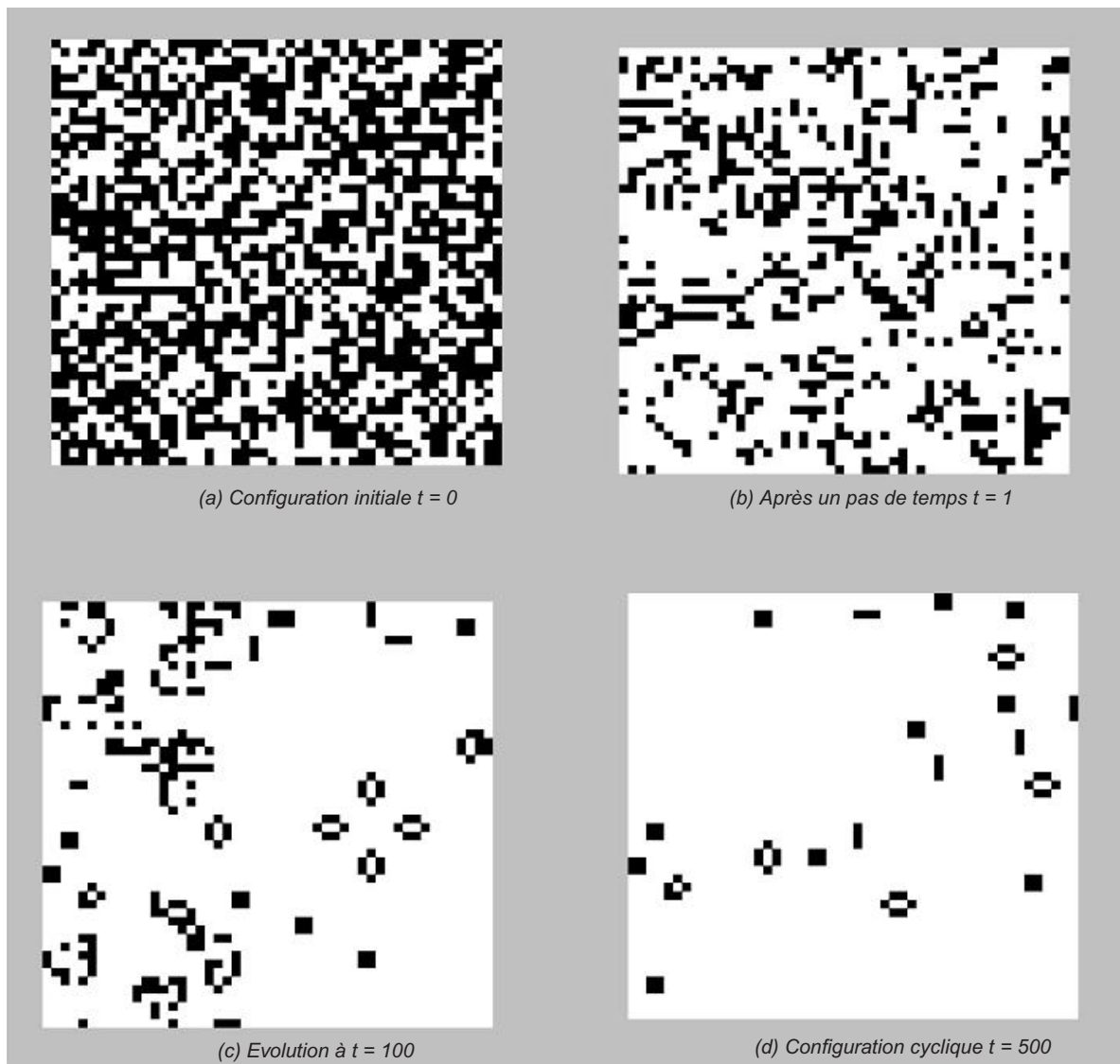
- (b) règle de survie : une cellule reste à l'état 1 si et seulement si elle possède deux ou trois voisines dans l'état 1, sinon elle passe à l'état 0.

Cet automate cellulaire est censé représenter quelques aspects d'une vie artificielle dans laquelle les cellules se reproduisent à trois et où elles meurent si elles sont trop entourées ou trop isolées ; en vérité, il s'agit surtout d'un modèle mathématique simple qui donne du fil à retordre à la communauté des chercheurs. Conway pose la question « Existe-t-il dans l'univers du Jeu de la vie une figure capable de croître à l'infini ? » et accompagne cette question d'un prix symbolique.

Pour comprendre l'intérêt d'un tel automate cellulaire, le lecteur curieux pourra s'essayer à prédire l'évolution de configurations simples de son choix. On s'aperçoit ainsi que déterminer le comportement de configurations initiales contenant une, deux ou trois cases est généralement facile, mais que le problème devient bien plus ténu au-delà. L'ordinateur apporte alors une aide précieuse d'autant que, contrairement aux problèmes issus de la physique faisant intervenir un grand nombre de variables, les simulations sont ici faciles à programmer. Le déroulement du Jeu de la vie permet d'observer des dynamiques complexes dans lesquelles certaines parties semblent se stabiliser alors que d'autres continuent à évoluer de manière imprédictible.

Le prix ne tardera pas à être remporté par un groupe de trois personnes ayant eu accès à ces simulateurs. Leur solution est une construction astucieuse appelée *lance-glisseur*, une figure qui évolue de manière cyclique et qui produit d'autres figures, les glisseurs, qui se déplacent en ligne droite à l'infini. La traque aux figures stables ne s'arrête pas là et une véritable course à la découverte est lancée entre des amateurs d'informatique, à tel point que le magazine *Time* dénoncera «les millions de dollars que représentent les heures de calcul perdus par cette horde de fanatiques». Ainsi, une véritable zoologie des figures stables de cet univers se crée. En 1982, cela aboutit à montrer que le modèle possède une capacité de calcul théoriquement illimitée : il est possible de concevoir une machine de Turing universelle dans le Jeu de la vie et il est possible d'y créer un automate auto-reproducteur. Plus qu'un résultat anecdotique, cela montre que le Jeu de la vie est un automate cellulaire pour lequel les prédictions d'évolution sont aussi difficiles à faire que pour une machine de Turing universelle. Or nous savons que la prédiction du comportement d'une telle machine est un problème indécidable : il n'existe pas d'algorithme permettant pour toute condition initiale de déterminer quelle sera l'évolution d'une telle machine. L'imprédictibilité du Jeu de la vie n'est donc pas due à notre incapacité à analyser les phénomènes mais trouve sa source dans la richesse même de ses dynamiques : on peut parler dans ce cas d'une «complexité intrinsèque».

Exemple d'évolution du Jeu de la vie

(a) Configuration initiale $t = 0$ (b) Après un pas de temps $t = 1$ (c) Evolution à $t = 100$ (d) Configuration cyclique $t = 500$

- (a) La configuration initiale est aléatoire chaque cellule a une chance sur deux de se trouver dans l'état 0 (carré blanc) ou 1 (carré noir).
 (b) Après un pas de temps, on s'aperçoit que la population (nombre de 1) a nettement diminué.
 (c) Après 100 pas de temps, le système évolue encore avec des zones stables (carrés par exemple) et des zones en pleine agitation.
 (d) Après 500 pas de temps, le système a atteint un état stable : c'est ici un cycle d'ordre 2.

Jusqu'où la simplification est-elle possible ?

L'acharnement des amateurs qui travaillent sur ce sujet jusque-là marginal n'aura donc pas été vain. Il a servi à montrer que l'on pouvait concevoir des mondes abstraits dans lesquels des calculs de complexité arbitraire peuvent être effectués alors que chaque composant de ce monde n'a que deux états et n'a qu'à obéir à une loi « locale » (i.e., qui ne dépend que de l'état des cellules voisines). Les automates cellulaires allaient alors devenir un sujet de recherche académique ; notamment sous l'im-

pulsion de S. Wolfram, qui en 1984, allait montrer expérimentalement et théoriquement que cette richesse de comportement n'était pas limitée aux seules dispositions des cellules sur une grille mais que leur disposition suivant une ligne était suffisante pour fournir des dynamiques riches.

Riches, oui mais jusqu'à quel point ? La question de savoir comment classer les automates cellulaires linéaires en fonction de leur dynamique reste ouverte à ce jour. Celle de savoir si l'on pouvait inclure une machine de Turing dans le cas où les cellules n'ont que deux états et

où elles se mettent à jour en fonction de leurs deux voisins (gauche et droite) et de leur propre état n'a trouvé de réponse que récemment avec la publication de résultats issus d'une collaboration entre S. Wolfram et un de ses doctorants. Bien d'autres problèmes de recherche qui commencent à peine à être explorés. Par exemple une question cruciale pour l'activité de modélisation est de savoir si un automate cellulaire garde le même comportement lorsqu'il est légèrement perturbé.

Quels apports pour notre perception des sciences ?

On peut diviser de façon sommaire la communauté de chercheurs qui travaillent sur les automates cellulaires en trois grandes catégories :

- ceux qui considèrent les automates cellulaires comme des modèles de calcul et qui cherchent à étudier la relation entre les règles de fonctionnement et les capacités des automates,
- ceux qui considèrent les automates cellulaires comme des systèmes dynamiques discrets et qui cherchent à connaître leurs propriétés d'évolution temporelle,
- ceux qui considèrent les automates cellulaires comme un outil de modélisation et qui les utilisent pour comprendre les caractéristiques de phénomènes observés dans la nature.

Il est inutile de préciser qu'avec l'essor grandissant des capacités de calcul et avec la généralisation de la modélisation comme outil de prédiction, la troisième communauté est celle dont l'expansion est la plus rapide. Pourtant, il ne faudrait pas en conclure que les problèmes théoriques qui se posent en amont pour les deux autres communautés sont des défis de pure logique sans conséquences pour les autres sciences. Au contraire, nous avons vu à travers la construction de von Neumann qu'ils permettent de faire émerger des problèmes profonds, tels que celui de la transmission de l'information dans la reproduction des organismes vivants, alors même que l'état des connaissances est insuffisant pour permettre de poser ces questions de façon précise. Quant à l'exemple du Jeu de la vie, il fournit un moyen de saisir comment un phéno-

mène imprédictible peut être obtenu en faisant interagir un grand nombre de composants élémentaires.

Cette prise de conscience de la primauté de l'étude des interactions plutôt que celle des constituants a amené de nombreux auteurs à spéculer sur l'apparition d'une «nouvelle science», une «science de la complexité». Pour notre part, nous pensons que cette appellation est prématurée et que cette nouvelle perception des sciences relève plus d'un changement épistémologique, c'est-à-dire dans la façon dont nous nous plaçons pour appréhender un problème scientifique. Pour illustrer notre propos, revenons au cas des cellules biologiques. Si l'on admet que les cellules virtuelles dont on simule le comportement sur un ordinateur fournissent une image «raisonnable» des cellules vivantes, alors il est urgent de réfléchir à la façon d'étudier le vivant. En effet, les progrès techniques sont tels que l'obstacle principal qui se pose à l'explication de phénomènes biologiques, des maladies par exemple, n'est plus celui de l'obtention de données précises mais plutôt notre ignorance de la dynamique des phénomènes collectifs. Bien entendu, une telle remarque ne doit nullement nous rendre pessimiste, elle nous suggère simplement que la solution à un problème scientifique ne passe pas seulement par la démarche dite «cartésienne» de décomposition-recomposition. Les observations d'un phénomène doivent donc être effectuées à une «juste échelle», ou même à plusieurs échelles, à charge pour les scientifiques de trouver comment le «micro» et le «macro» peuvent s'influencer l'un l'autre.

Références

- 1 FATÈS N., Les automates cellulaires. Vers une nouvelle épistémologie ?, Mémoire de DEA de l'université Paris I-Sorbonne, 2001. Disponible en ligne sur : <http://nazim.fates.free.fr>.
- 2 DELORME M., MAZOYER J., La riche zoologie des automates cellulaires, *Pour la science*, 2003, 314.
- 3 WOLFRAM S., A new kind of science, Wolfram Media, 2002.

Nazim Fatès

12 rue de la Salpêtrière - 54000 Nancy
nazim.fates@loria.fr