

Quelle que soit la configuration placée seule sur le damier à l'instant 0, et même si elle est complexe, en attendant suffisamment longtemps, on retrouvera la configuration en plusieurs exemplaires : toute configuration s'autoréplicque spontanément et indéfiniment ! Le plus simple de ces automates cellulaires est l'automate dénommé *Replicator* (voir la figure 1).

Le spectacle de cette autoreproduction est fascinant, car avant de voir réapparaître les copies de la configuration initiale placée sur le plan, un désordre complet semble régner. Ce miracle de l'autoreproduction de toute structure se démontre mathématiquement. Ce n'est, finalement, que la conséquence d'une propriété arithmétique qui n'a rien à voir avec le monde vivant et que celui-ci, bien sûr, n'utilise pas.

Il n'y a pas que dans le monde des automates qu'une multiplication d'objets complexes peut se dérouler sans que cela soit comparable avec la reproduction biologique. Dans notre monde physique, nous connaissons la photocopieuse. La feuille, quelle que soit la complexité de ce qui y est imprimé ou écrit, se trouve dupliquée par la machine. Il

existe aussi des photocopieuses 3D qui reproduisent certains objets par stéréolithographie. On peut imaginer que, dans le futur, les techniques pour réaliser de tels appareils se perfectionneront et aboutiront, comme dans les romans de science-fiction, à des systèmes quasi parfaits dupliquant atome par atome tout objet qu'on y place. Un être présent dans un univers où de telles machines existent a la capacité de s'autoréplicquer : il lui suffit de se placer dans la machine et de la faire démarrer.

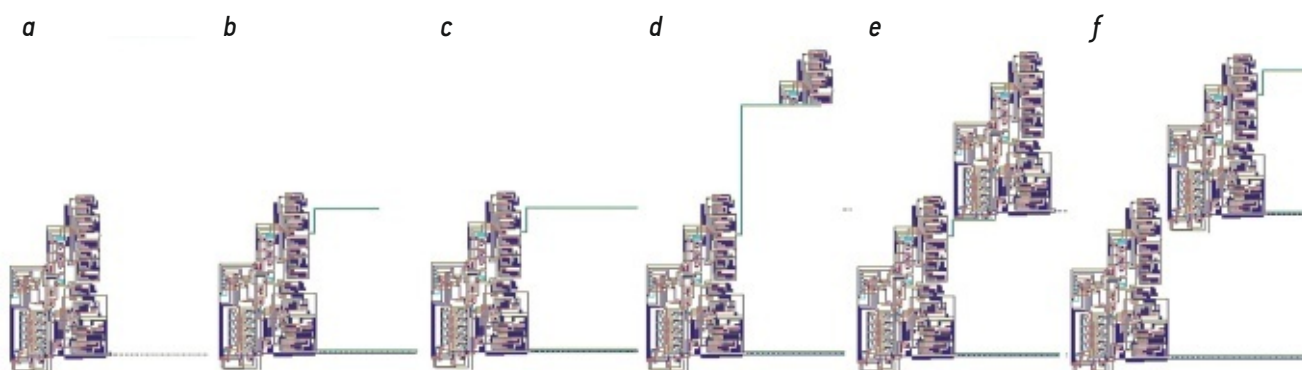
Un cas tout à fait extrême d'autoréplication physique de structures complexes et n'ayant rien à voir encore avec la biologie est celui proposé par Hugh Everett qui, dans sa théorie des mondes multiples, imagine que l'univers dans sa totalité s'autoréplicque à chaque instant.

Ainsi, l'autoréplication de structures complexes est parfois possible sans pour autant correspondre à celle des êtres vivants. Poursuivons donc notre recherche d'une bonne définition. On sait que chaque cellule vivante porte dans ses molécules d'ADN le plan de sa structure (ou en tout cas une partie importante de ce plan). Lorsqu'un orga-

nisme vivant se duplique, le « code » de sa structure est, d'une part, traduit en protéines qui forment le nouvel organisme et, d'autre part, copié pour qu'il ait lui aussi le plan permettant sa réplication. Ce double mécanisme de traduction/copie est essentiel chez tout être vivant évolué. Une autoréplication susceptible de nous aider dans notre compréhension du vivant doit donc fonctionner selon un tel schéma « génétique ».

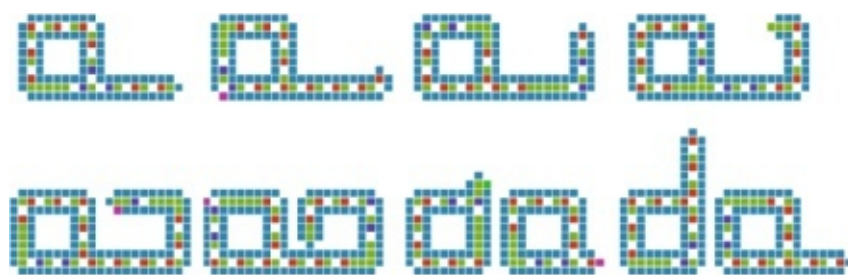
Un schéma génotype-phénotype

C'est ce qu'avait compris von Neumann, et cela bien avant que la structure de l'ADN n'ait été découverte. Le fonctionnement de la configuration autorépliquatrice, que ce soit dans la version de Nobili-Pesavento ou dans celle de Buckley, respecte ce schéma génétique « machinerie + ruban » (voir la figure 3). Il y a bien l'équivalent d'un génome dans la configuration (la ligne horizontale partiellement représentée). De plus, lors de l'autoréplication, le ruban est copié en un second identique. Ensuite, il est lu et traduit en une structure en deux dimensions : le

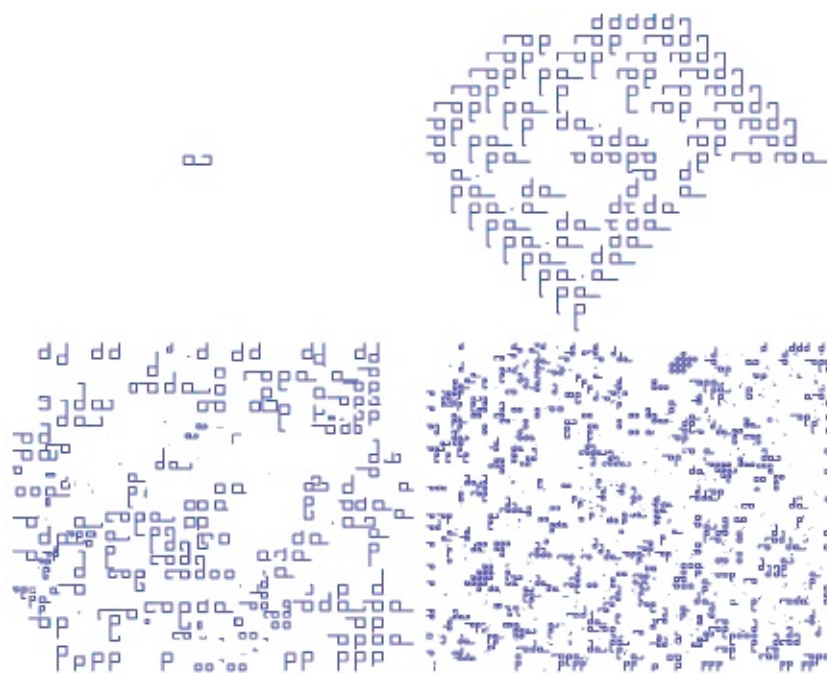


3. VON NEUMANN A CONÇU UNE CONFIGURATION autoreproductrice si complexe qu'il ne put la faire fonctionner à la main, ni avec les ordinateurs disponibles à son époque. Il fallut attendre 2008 pour que cette configuration, légèrement simplifiée par Renato Nobili et Umberto Pensavento en 1995, et mise en forme cellule par cellule par Tim Hutton, fonctionne dans un programme. Ce programme nommé *Golly* a été élaboré par la communauté des passionnés d'automates cellulaires (voir la bibliographie). La configuration de von Neumann (dans la version de Nobili-Pesavento) comporte deux parties : une machinerie qui commande et exécute la réplication, et un ruban qui contient sous forme codée le plan de la machinerie. Ce ruban, assimilable à un génome, est extrêmement long et représenté partiellement ici. L'autoréplication comporte deux phases : dans un premier temps, la machinerie lit et copie le

ruban pour en fabriquer un second placé au-dessus du premier (a, b, c). Dans un second temps, la machinerie exploitant les données du ruban à l'aide d'une sorte de bras mobile (composés de cellules de l'automate) interprète ces données et place, une à une, toutes les cellules de la partie machinerie de son double (d, e, f). Quand cette mise en place est terminée, la nouvelle machinerie est enclenchée et se met à son tour à produire une copie de son ruban et d'elle-même. Plus de 50 ans après sa conception, il est ainsi possible d'admirer le spectacle de la duplication de la configuration autoreproductrice de von Neumann. Notons que bien que le *Jeu de la vie* de Conway soit le plus étudié des modèles d'automates cellulaires et qu'on sache qu'il est possible de fabriquer des configurations autoreproductrices avec lui, personne pour l'instant n'a su en concevoir une et la faire fonctionner.



4. LA BOUCLE DE LANGTON ET QUELQUES ÉTAPES DE SON ÉVOLUTION. L'autoréplication des automates de la figure 3 ne fonctionne pas du tout comme celle des êtres vivants, car notre univers n'est pas un automate cellulaire de type *Replicator* produisant systématiquement la multiplication de toute structure. Pour modéliser d'une manière satisfaisante le type d'autoréplication observé dans le monde vivant, il faut exiger qu'elle procède selon le schéma « génétique » : génotype + phénotype → génotype + phénotype. Autrement dit, il faut imposer que la réplication se fasse en deux étapes : (a) copie d'un ensemble d'informations en général présent sur un ruban et constituant le génotype ; (b) traduction de ce codage en structure. L'ordre (a)-(b) peut être inversé. C'est d'ailleurs le mode de fonctionnement de l'autoréplication du système proposé par von Neumann. Peut-on faire plus simple dans le monde des automates cellulaires tout en respectant le schéma génétique ? Oui, et la boucle de Christopher Langton (1984) en est la preuve.



5. LES BOUCLES ÉVOLUTIVES. Les boucles de Langton sont incapables de construire une grande variété d'autres objets et encore moins capables de donner naissance à des boucles d'une autre forme qui elles-mêmes s'autoreproduiraient. Les recherches récentes ont conduit à la mise au point de boucles pouvant construire un ensemble varié d'autres objets complexes quand on en change le génome. Les boucles *Evoloop* de Hiroki Sayama donnent naissance à des boucles de formes et de tailles différentes. Les formes créées sont en compétition. Dans un espace ensemencé avec une seule boucle *Evoloop*, on voit se dérouler une micro-évolution darwinienne. Dans un premier temps, la boucle se multiplie sans presque changer. Quand l'espace (fini) devient insuffisant, les collisions entre boucles provoquent des mutations des génomes et des boucles nouvelles apparaissent, parfois très brièvement car elles ne sont pas viables. Dans la compétition pour l'espace, les boucles de petites tailles, moins fragiles, tendent à dominer. Les dessins représentent quatre phases de cette évolution compétitive entre organismes simulés.

plan de la « photocopieuse » est exploité pour construire une seconde « photocopieuse ». Au final, on obtient deux fois le même ensemble machinerie + ruban.

Nous comprenons pourquoi von Neumann ne s'est pas contenté d'un automate cellulaire de type *trivial* ou *Replicator*. Mais, en imposant aux systèmes autorépliquateurs de fonctionner selon le modèle génétique, peut-on envisager plus simple que son énorme et très lente machine ?

Boucles de Langton

Oui ! La découverte date de 1984 et est due à Christopher Langton. Une boucle de 86 cellules au départ est composée d'une sorte de tuyau protégeant un « génome ». En fonctionnant, cette boucle émet une excroissance qui, en 150 étapes, engendre une seconde boucle à l'intérieur de laquelle le génome de la première a été copié. Ces deux boucles en engendrent alors de nouvelles et, progressivement, tout le plan se recouvre de copies de la boucle initialement présente en un seul exemplaire (voir la figure 4).

Étonnamment, la boucle de Langton a été simplifiée plusieurs fois. On a fait disparaître le tuyau protecteur (en fait inutile) et on est arrivé, avec la boucle de Chou-Reggia en 1993, à une configuration autorépliquatrice de six cellules possédant une sorte de génome. Cependant, quand on voit fonctionner cette boucle, le génome est devenu difficile à identifier et on a même quelques doutes sur sa véritable nature de génome. En fait, il semble qu'on en arrive plutôt à un schéma proche de l'automate *trivial*. Il y a une continuité entre l'automate *trivial* et la boucle de Langton !

L'explication de cette troublante situation est qu'on a oublié quelque chose qui, aux yeux de von Neumann, était essentiel : le système génétique doit être puissant. Il doit autoriser non seulement l'autoréplication, mais aussi la création d'autres structures. Autrement dit : il faut qu'on puisse, en modifiant le génome de nos configurations, construire d'autres configurations différentes (qui seront autorépliquatrices ou non). C'est une telle condition qui assure qu'une

évolution par variation peut se dérouler. Comment exprimer cette condition sur la puissance du système génétique ?

La notion de constructeur est la solution. On va exiger qu'une large classe de configurations puissent être produites par la machinerie de notre configuration autoreproductrice quand on en change le ruban génétique.

La configuration autoreproductrice de von Neumann satisfait cette exigence nouvelle. Quelle que soit la configuration C (prise dans une large classe de configurations), il y a un génome G qui, quand on le présente à la machinerie, produit C. La boucle de Langton n'a pas cette propriété ; ainsi, elle est certes plus simple que la configuration de von Neumann, mais ne modélise pas convenablement l'autoréplication des êtres vivants évolués.

Signalons aussi qu'une façon d'obliger les automates autoreproducteurs à n'être pas trop simples, ce que von Neumann ne perd jamais de vue, est d'exiger qu'ils soient capables de mener tout calcul réalisable par ordinateur. Il ne semble pas que cette fonctionnalité doive être prise en compte systématiquement quand on cherche à modéliser l'autoreproduction des êtres vivants, puisqu'on sait bien qu'ils n'ont pas cette capacité de tout calculer.

Dans le monde réel, tout n'est pas génétiquement productible par n'importe quelle cellule vivante utilisée comme machinerie de synthèse. Si l'on souhaite construire des modèles fidèles aux schémas logiques de la vie, il faut donc imposer des conditions de constructibilité larges, mais raisonnables, et ne considérer les conditions de calculabilité que comme des options facultatives. En adoptant une telle attitude, il semble bien que nous soyons arrivés à une notion satisfaisante, qui rend compte du vivant et du type d'autoréplication à l'œuvre.

Le modèle auquel nous sommes arrivés de ce qu'est un être autoreproducteur du type des êtres vivants est pertinent, mais sous une forme moins mathématique qu'on pouvait l'espérer. Ce défaut résulte de l'imprécision sur la classe des configurations que la machinerie d'un être autoreproducteur doit être capable de fabriquer et de l'imprécision sur le type de complexité que doit

posséder le système. Von Neumann n'a proposé ni l'automate *trivial*, ni le *Replicator*, ni les boucles de Langton, car il voulait un modèle assez proche du modèle observé en biologie et qui permet l'évolution dès qu'un mécanisme aléatoire de modification des génomes est ajouté.

Le fait qu'il ait réussi à élaborer un tel système autoreproducteur dans l'univers des automates cellulaires prouve que, sur un plan logique, le type d'autoreproduction observé dans le monde vivant n'est pas miraculeux. Cette preuve directe que le modèle génétique de la vie peut s'appuyer sur une physique discrète et relativement simple est une grande avancée.

Notons que, si les boucles de Langton ne sont pas des structures autoreproductrices du type de celles recherchées par von Neumann, elles ont cependant inspiré de nouvelles recherches qui ont abouti à des simplifications de la machinerie de von Neumann. C'est le cas des boucles de Gianluca Tempesti, un peu plus compliquées que celles de Langton (148 cellules contre 86), mais qui ont une capacité de construction assez générale. D'autres modèles, comme le *EvoLoop* de Hiroki Sayama, conduisent à une famille de boucles autoreproductrices de tailles et de formes variées, en même temps qu'à un processus de compétition entre ces boucles. Dans un univers très simplifié d'automates cellulaires, on assiste alors à des dynamiques ressemblant assez fidèlement dans leurs principes logiques à celles qu'on voit dans le monde vivant et dont il est certain qu'elles auraient enchanté von Neumann (*voir la figure 5*).

Galilée et Newton ont montré que si les lois physiques sont comme ils les ont formulées, alors les planètes n'ont pas besoin que Dieu s'occupe d'elles à chaque instant. De même, von Neumann a montré que la vie n'a pas besoin d'un miracle continu pour fonctionner et que le type d'autoreproduction qu'elle pratique s'obtient simplement en respectant le schéma génétique et en autorisant l'évolution. Son travail met un terme définitif aux arguments de type vitaliste qui affirmaient que la vie est trop complexe pour être réduite à de la physique. ■



Jean-Paul DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

✓ BIBLIOGRAPHIE

A. Trevorrow et T. Rokicki, *Golly*, [programme et configurations permettant d'exécuter les systèmes autoreproducteurs mentionnés dans l'article] 2011 : <http://golly.sourceforge.net/>

M. Holzer et M. Kutrib, *Cellular automata and the quest for non trivial artificial self-reproduction*, dans *Membrane Computing*, Lecture Notes in Computer Science n° 6501, pp. 19-36, Springer, 2011.

R. Freitas et R. Markle, *Kinematic Self-Reproduction Machines*, Landes Bioscience, 2004.

D. Mange et A. Stauffer, *Sur la piste des machines autorépliquantes*, *Pour la Science* n° 323, pp. 62-68, septembre 2004.

B. McMullin, John von Neumann and the evolutionary growth of complexity : looking backwards, looking forwards, *Artificial Life*, vol. 6(4), pp. 347-361, 2000.

C. Langton, *Self-reproduction in cellular automata*, *Physica D*, vol. 10, pp. 135-144, 1984.

J. von Neumann, *Theory of Self-Reproducing Automata*, University of Illinois Press, 1966.