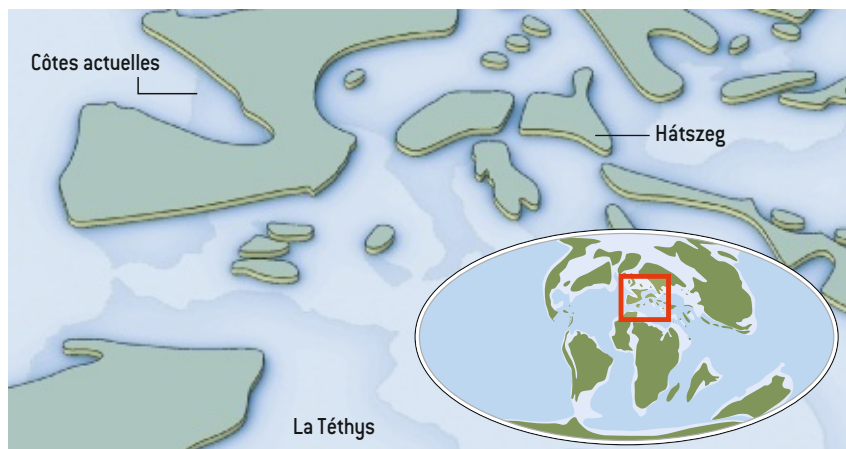


de Hâtszeg en particulier, seront probablement déterminants pour comprendre la répartition globale des dinosaures juste avant leur apogée, il y a 65 millions d'années.

Forgées à une époque où la paléontologie et la géologie étaient encore des sciences jeunes, et où la théorie de l'évolution faisait l'objet de vives discussions, les théories de Nopcsa étaient étonnamment avant-gardistes. Nul doute qu'elles ont bénéficié de son statut d'aristocrate. De par sa richesse, Nopcsa profitait d'énormes avantages par rapport au chercheur moyen. Il effectuait librement, dans tout l'empire, ses expéditions de chasse aux fossiles et visitait les grands musées européens. Il semble qu'il aimait ces escapades, troquant volontiers sa parure de noble viennois pour la tenue grossière du berger des Balkans. Parlant plusieurs dialectes albanais, Nopcsa disparaissait des mois, voire des années, dans les collines de l'Albanie, avec pour seule compagnie son secrétaire et amant, l'Albanais Bajazid Elmasz Doda.

Une mort tragique

Pendant plus de dix ans, Nopcsa a ainsi accumulé une énorme quantité de données géologiques, météorologiques et ethnographiques, en grande partie publiées dans les principaux journaux scientifiques de l'époque. Les événements mondiaux le rattrapèrent cependant. Après la défaite, en 1918, de l'Allemagne et de ses alliés – dont l'Autriche-Hongrie –, la Transylvanie fut cédée à la Roumanie. Nopcsa, qui avait perdu ses domaines, et donc ses revenus, s'inquiéta de la façon dont il pourrait poursuivre sa vie de scientifique ambulant. Pour s'en sortir, il accepta le poste de directeur de l'Observatoire géologique de Hongrie et s'installa à Budapest. Mais la vie institutionnelle ne convenait pas à son caractère indépendant. Le baron quitta bien vite son poste pour reprendre ses voyages avec Doda, à moto dans les Balkans et en Italie, recherchant des fossiles et effectuant des relevés géologiques. Pour subvenir à leurs besoins, il vendit la majeure partie de sa collection de fossiles – y compris ses chers dinosaures de Transylvanie – au *British Museum*, qu'il avait souvent visité par le passé en tant que scientifique invité.



Quelques mois avant sa mort, Nopcsa fut invité à la Société géologique d'Anvers, en Belgique. Il fit le voyage en dépit d'une forte fièvre, mais tomba très malade la nuit qui précédait son intervention. Néanmoins, sans préparation, il tint sa conférence, en français, sur la géologie de l'Albanie, devant une assemblée enthousiaste. « À chacune de mes conférences, écrivit-il à un ami une fois rentré à Budapest, la salle est remplie de dames qui espèrent plus des récits d'aventure que des explications scientifiques. » Un exercice auquel le « baron dinosaure » se pliait volontiers.

La vie de Nopcsa s'acheva par une tragédie. Le 25 avril 1933, le chasseur de fossiles, indigent et déprimé, servit à Doda une tasse de thé drogué, puis tua son amant d'une balle dans la tête avant de retourner l'arme contre lui. Dans une lettre laissée à la police, il expliquait : « La raison de mon suicide est mon système nerveux, qui est à bout. J'ai tué dans son sommeil mon vieil ami et secrétaire, M. Bajazid Elmasz Doda, sans lui laisser entrevoir ce qui allait se passer, car je ne voulais pas l'abandonner à la maladie, la misère et la pauvreté, il aurait trop souffert. »

L'héritage scientifique de Nopcsa n'a cependant pas disparu avec lui. Les dinosaures de Transylvanie font l'objet de recherches depuis une bonne trentaine d'années, réalisées par des paléontologues roumains nombreux et actifs. Leurs recherches ont permis d'augmenter de façon spectaculaire la liste des vertébrés fossiles transylvaniens connus du Crétacé supérieur, et de mieux comprendre leurs relations paléogéographiques.

2. SELON NOPCSA, l'inondation d'une grande partie de l'Europe du Sud par la mer, à la fin du Crétacé, il y a 70 millions d'années, laissa émergé un archipel d'îles, qui auraient servi d'étapes aux dinosaures. Ceux qui y seraient restés auraient évolué vers des tailles inférieures, en s'adaptant aux ressources restreintes des îles. Une de ces îles, nommée Hâtszeg par le baron, aurait été située sur ses terres.

✓ BIBLIOGRAPHIE

E. Buffetaut, *Chercheurs de dinosaures en Normandie*, Ysec, 2011.

G. Dyke *et al.*, Early cretaceous (Berriasian) birds and pterosaurs from the cornet bauxite mine, Romania, *Paleontology*, vol. 54, n°1, pp. 79-95, 2011.

European island faunas of the Late Cretaceous – The Hateg island, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 293, n°3-4, 2010.

K. Stein *et al.*, Small body size and extreme cortical bone remodeling indicate phyletic dwarfism in *Magyarosaurus dacus* (sauropoda : titanosauria), *PNAS*, vol. 107, n° 20, pp. 9258-9263, 2010.

G. Erickson *et al.*, Was dinosaurian physiology inherited by birds ? Reconciling slow growth in *Archaeopteryx*, *PLoS ONE*, vol. 4, n° 10, e7390, 2009.

LOGIQUE & CALCUL

L'autoréplication maîtrisée ?

Les astucieux travaux pour perfectionner et simplifier le modèle d'autoréplication de von Neumann nous font réfléchir à ce qu'est l'autoreproduction du vivant.

Jean-Paul DELAHAYE

Les êtres vivants sont des agrégats compliqués de composants simples et, selon toute théorie probabiliste ou thermodynamique raisonnable, ils sont très improbables. La seule chose qui explique ou atténue ce miracle est le fait qu'ils se reproduisent : si, par accident, il en apparaît un seul, alors les principes des probabilités ne s'appliquent plus et il s'en produit beaucoup.

John von Neumann, *Theory of Self-Reproducing Automata*, 1966.

Un des grands sujets de la science-fiction est l'autoreproduction (ou autoréplication) : la réalisation de robots qui pourraient se dupliquer, sans que, après lancement du processus, il faille intervenir autrement que par apport de matière première et d'énergie.

À la fin des années 1940 et au début des années 1950, le mathématicien américain d'origine hongroise John von Neumann mena une série de travaux sur le sujet. À sa mort en 1957, ses travaux furent repris par Arthur Burks qui, en 1966, les regroupa dans un livre célèbre : *Theory of Self-Reproducing Automata*. L'ouvrage a donné naissance à une multitude de projets de recherche.

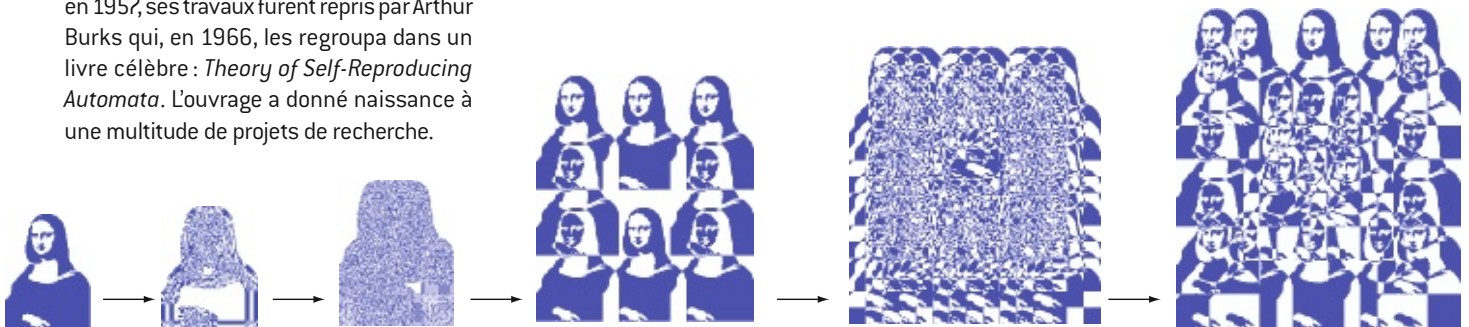
Von Neumann cherchait à démontrer la possibilité d'un robot autoréplicateur et Stanislas Ulam lui suggéra d'étudier le problème dans un monde abstrait simplifié. Le modèle retenu, aussi élémentaire que possible, fut celui des automates cellulaires. Ces calculateurs abstraits élémentaires pavant un damier infini (voir la figure 2) ont contribué à l'essor d'une discipline scientifique à la charnière des mathématiques et de l'informatique.

L'autoreproduction, dont von Neumann prouva la possibilité logique, a été étudiée sous des angles théoriques et pratiques. En robotique, on s'intéresse à la mise au point de dispositifs autoreproducteurs de grande taille ; dans les nanotechnologies, on envisage des systèmes microscopiques aptes à se multiplier spontanément, par exemple des circuits.

La configuration autoreproductrice décrite par von Neumann est extraordinairement complexe et si, mathématiquement, elle est bien définie, le texte de von Neumann reste théorique et n'explique pas, cellule par cellule, comment on pourrait la réaliser.

Il a fallu attendre 1995 pour qu'une configuration complète soit mise au point par Renato Nobili et Umberto Pesavento. Pour en faciliter la réalisation, le modèle italien modifiait légèrement celui de von Neumann : les cellules avaient 32 états au lieu de 29. La configuration autoreproductrice comporte alors 6 329 cellules et un ruban de codage (une sorte de génome définissant sa constitution interne) long de 145 315 cellules. Sa duplication (ruban de codage compris) exige 63 milliards d'étapes. Longtemps, la puissance informatique disponible n'a pas permis de répliquer leur construction sur écran d'ordinateur, mais ce fait d'armes a été réalisé récemment.

La programmation complète d'une configuration autoreproductrice suivant exactement l'automate cellulaire à 29 états de von Neumann a enfin été réalisée en 2008 par William Buckley. Elle comporte 18 589 cellules, le ruban de codage en compte 294 844 et il faut 261 milliards d'étapes pour que s'opère la réplication. En quelques dizaines de minutes, nos ordinateurs permettent l'exécution complète du processus d'autorepro-



duction, et l'on a ainsi pu admirer pour la première fois le fonctionnement du système conçu par von Neumann ! Grâce au programme gratuit *Golly* (<http://golly.sourceforge.net/>), vous pouvez sur votre micro-ordinateur assister à cette étonnante pièce de théâtre mathématique restée injouable pendant plus de 50 ans, soit dans sa version Nobili-Pesavento, soit dans sa version Buckley, plus fidèle à von Neumann, mais encore très lente aujourd'hui.

Des modèles simplifiés d'autoréplication

Nous n'avons pour l'instant évoqué que les versions d'autorépliations qui suivent de près le schéma adopté par von Neumann. Toutefois, reprenant le problème de l'autoréplication sur des bases parfois éloignées, d'autres modèles, mécaniques ou informatiques, ont été conçus et, dans certains cas, mis en œuvre.

Un délicat problème, qui semble avoir suscité quelques contresens, a fini par se poser. Les simplifications importantes du modèle d'autoréplication de von Neumann, proposées par exemple par Christopher Langton en 1984 (voir la figure 4), ont mené à des configurations bien plus petites que celle de von Neumann, comportant parfois moins d'une dizaine de cellules au départ. De ce fait, on a été tenté de conclure que von Neumann avait été maladroit en concevant un automate cellulaire d'une absurde complication. Nous verrons que la question est assez subtile. C'est en replaçant le travail de von

Neumann dans la perspective de son époque et en prenant en compte ses motivations liées à la biologie qu'on mesure combien son étude est novatrice et constitue une percée scientifique de première importance.

Reprenons le problème de l'autoreproduction. Pour qu'il ait un sens, il faut bien sûr se donner un « monde » avec des « lois physiques » précises qui fixeront le théâtre de l'action. Cela peut-être le nôtre, ou cela peut être un monde simplifié décrit par des règles que le langage mathématique exprimera sans ambiguïté. Toutes sortes de modèles abstraits sont en mesure de jouer ce rôle de « monde simplifié », mais celui des automates cellulaires est particulièrement séduisant, pour plusieurs raisons qui expliquent pourquoi il fut retenu par von Neumann.

D'abord, les univers d'automates cellulaires sont discrets (pas de variables continues) ; ils sont donc faciles à programmer et n'exigent pas des calculs approchés pour en suivre l'évolution. Autre qualité, les interactions y sont, comme dans notre univers, locales : aucune interaction instantanée à distance n'est possible ; de plus les lois que l'on retient peuvent être d'une extrême simplicité. Enfin, on sait par expérience que les automates cellulaires autorisent la simulation de nombreux phénomènes physiques parfois complexes, au point qu'il a été envisagé, par exemple par Konrad Zuse dès 1967, que notre univers physique pourrait n'être, à un niveau de détail très fin, qu'une sorte d'automate cellulaire.

Un modèle d'univers étant fixé, qu'est-ce que l'autoréplication dans cet univers,

et comment peut-on la définir pour mieux comprendre l'autoréplication dans le monde vivant ? Nous envisagerons plusieurs idées et découvrirons progressivement que, si nous voulons obtenir un modèle pertinent pour la biologie, nous ne devons pas nous limiter à la définition naïve suivante :

L'autoréplication, c'est lorsqu'un objet présent en un exemplaire unique dans l'univers se retrouve plus tard en plusieurs exemplaires.

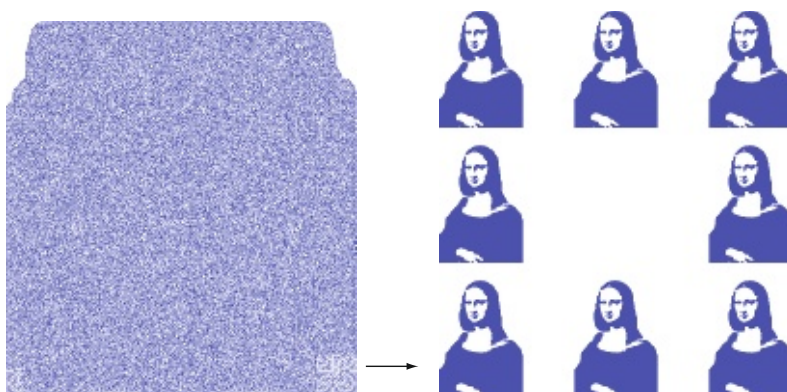
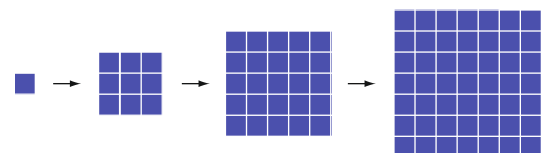
Réplication évidente

Quand les autorépliations sont le résultat direct des lois du monde retenu, elles ne nous apprendront rien d'intéressant en biologie. L'exemple le plus simple est celui de l'automate cellulaire nommé *trivial* et défini par :

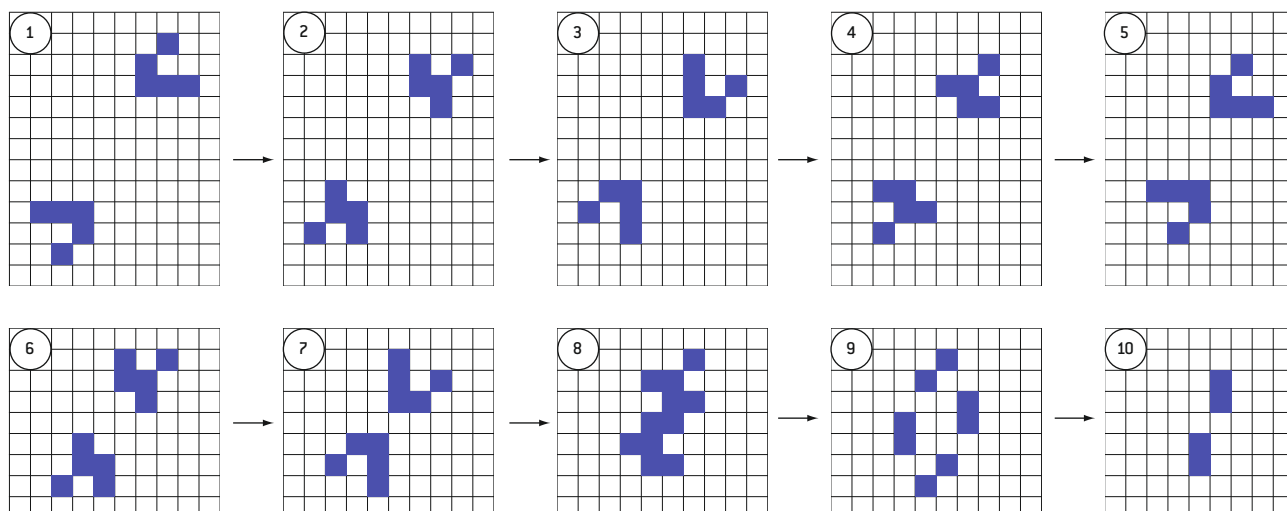
– Une cellule peut être dans l'état mort (*blanc*) ou dans l'état vivant (*bleu sur l'illustration ci-dessous*).

– Une cellule reste vivante à l'instant $n + 1$ si elle l'est à l'instant n ; une cellule passe de l'état mort à l'état vivant si l'une de ses huit voisines est vivante.

Partant d'une cellule vivante à l'instant 0, on obtient successivement neuf copies d'elle-même, puis 16, puis 25, puis 36, etc. Cette autoréplication est conforme à la définition naïve, mais elle est tellement simple qu'elle



1. UNE ÉTONNANTE DÉCOUVERTE a été faite par Edward Fredkin et par Serafino Amoroso et Gerald Cooper : il existe des automates cellulaires, comme l'automate *Replicator*, qui dupliquent toute structure, aussi complexe soit-elle. Les règles de l'automate sont : une cellule peut être dans l'état mort (*blanc*) ou dans l'état vivant (*bleu*) et d'un instant au suivant, une cellule reste vivante ou passe de l'état mort à l'état vivant, si, parmi ses huit cellules voisines, un nombre impair sont vivantes. On a représenté ici quelques étapes du processus de multiplication d'une figure complexe : la silhouette de la *Joconde*. Après 256 étapes de l'application de la règle, le motif est reproduit huit fois. Il est assez facile de prouver la propriété de multiplication de toute configuration et de la généraliser. On peut, si on le souhaite, utiliser un automate ayant plus de deux états, mais il faut que le nombre d'états soit un nombre premier. On peut, au lieu d'obtenir huit copies du motif initial, n'en obtenir que deux, ou n'importe quel nombre fixé à l'avance.



2. JOHN VON NEUMANN A UTILISÉ LES AUTOMATES CELLULAIRES pour démontrer la possibilité de l'autoreproduction. Chaque case (ou cellule) carrée d'un damier infini porte le même petit automate. Cet automate peut être dans un état pris parmi un nombre fini d'états fixés à l'avance. L'évolution se fait selon un temps discret : l'état de l'automate à l'instant $n + 1$ est déterminé par son propre état et ceux de ses voisins (par exemple les huit automates disposés autour de lui, ou une autre combinaison fixée une fois pour toutes) à l'instant n . L'automate cellu-

laire le plus étudié est l'automate du *Jeu de la vie* de John Conway : chaque cellule-automate est dans l'état vivant (*bleu*) ou mort (*blanc*) ; si une cellule est vivante et qu'elle est entourée de deux ou trois cellules vivantes elle reste vivante, sinon elle meurt ; si une cellule est morte et qu'elle est entourée de trois cellules vivantes, elle passe dans l'état vivant, sinon elle reste morte. On a représenté ici les dix étapes de la rencontre de deux configurations glisseurs (configuration se déplaçant en diagonale) conduisant à leur annihilation mutuelle à l'étape suivante.

ne nous apprend rien ! Dans notre univers, les lois de conservation de l'énergie et de la matière interdisent ce type d'autoréplication. Il n'est cependant pas impossible d'avoir des situations proches, où par exemple une particule et de l'énergie produisent deux particules identiques. Les prions anormaux qui provoquent la maladie de la vache folle se multiplient par contact en transformant la molécule *Prp-c* (normalement présente et sans effet nocif) en molécule *Prp-sc* (le prion anormal), tout comme le fait une cellule bleue de l'automate *trivial* qui transforme les cellules blanches qui l'entourent. Notons que dans ce type d'autoréplication, seuls des objets élémentaires se multiplient.

Un autre type d'autoréplication évidente, cette fois par gros blocs, est possible dans notre univers. Si l'on impose à l'univers une loi de conservation de la matière, le système autoréplicateur doit aller chercher les composants de son double dans son environnement et les assembler. C'est ce qui se passe dans le monde vivant ; l'idée que des composants sont disponibles et que s'autoréplicier, c'est les collecter et les assembler, n'est ainsi pas à exclure.

Un cas extrême et facile à réaliser en robotique est le suivant. Le robot A-B est formé de deux morceaux A et B (par exemple une tête et un corps) qui, isolément, sont inertes. Assembler deux éléments A et B se fait facilement, par exemple à l'aide d'aimants qui, dès que A et B sont proches, les solidarisent. On suppose aussi que la mise en contact de A et de B met en marche le robot A-B. Le sol environnant contient des morceaux A et B, inertes, car isolés. On programme le robot A-B de telle façon que, dès sa mise en marche, il recherche un morceau A et un morceau B, puis les assemble, ce qui donne alors un autre robot A-B, qui lui-même se met en marche, etc.

Certaines réalisations en robotique sont des systèmes autoréplicateurs dans ce sens : le robot assemble quelques pièces complexes déjà présentes dans son environnement et produit ainsi un double de lui-même. Les cristaux, et peut-être même les virus, sont autoréplicateurs dans ce sens.

De telles autoréplications ne sont pas satisfaisantes pour décrire ce que l'on observe dans le monde des êtres vivants évolués : dans un véritable processus d'autoréplica-

tion, il faut que l'objet qui se multiplie soit lui-même complexe et ne résulte pas de l'assemblage d'un petit nombre de composants complexes déjà là. En clair, à la définition naïve donnée précédemment, il faut ajouter :

Pour qu'il y ait vraiment autoréplication, l'objet qui se multiplie ne doit pas être trop simple et ne doit pas résulter de l'assemblage de quelques morceaux complexes présents dans son environnement.

Malheureusement, cette modification n'est pas encore satisfaisante. Ni dans un monde semblable au nôtre ni dans un monde d'automates cellulaires, les nouvelles exigences ne garantiront une autoréplication semblable dans sa logique à celle observée chez les êtres vivants.

Autoréplication d'une structure complexe

Commençons par le montrer dans le cas des automates cellulaires. Von Neumann l'ignorait (sinon il l'aurait mentionné), mais il existe une famille d'automates cellulaires simples et remarquables qui ont la très étonnante propriété suivante.

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'autoréplique 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'autoréplicuer : il lui suffit de se placer dans la machine et de la faire démarrer.

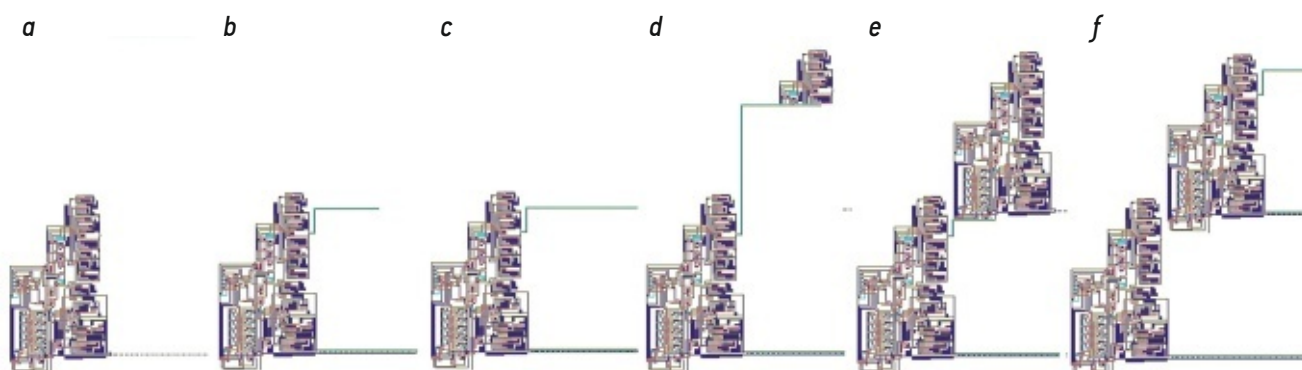
Un cas tout à fait extrême d'autoréplication physique de structures complexes et n'ayant rien à voir encore avec la biologie est celui proposé par Hugh Everett qui, dans sa théorie des mondes multiples, imagine que l'univers dans sa totalité s'autoréplicue à chaque instant.

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 ».

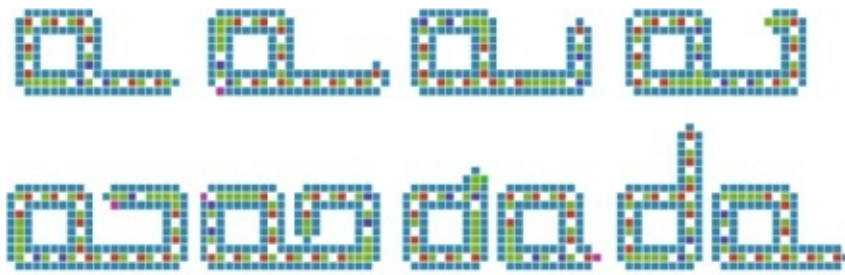
Un schéma génotype-phénotype

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 autorépliquante, 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

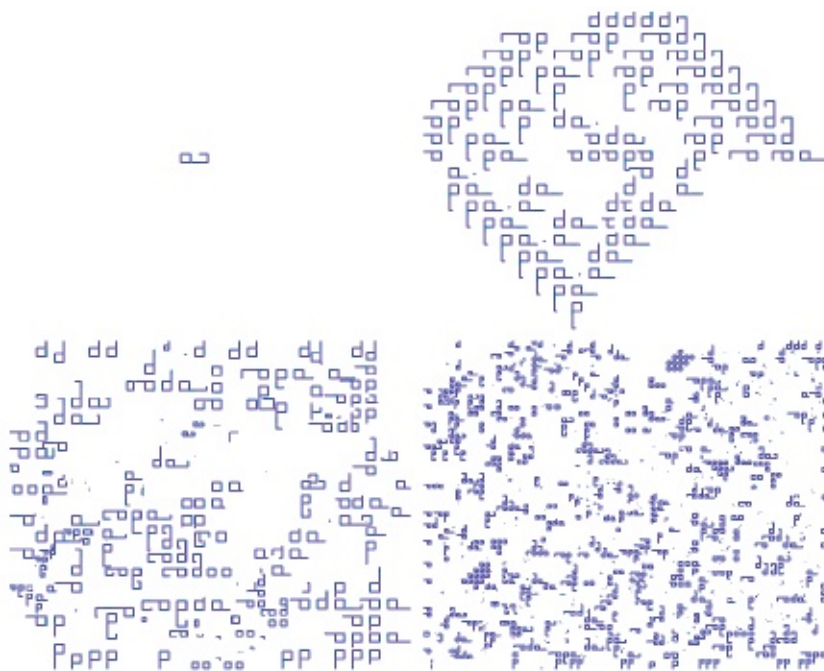


3. VON NEUMANN A CONÇU UNE CONFIGURATION autoreproductrice si complexe qu'il ne put la faire fonctionner à la main, ni avec les ordinateurs disponibles à son époque. Il fallut attendre 2008 pour que cette configuration, légèrement simplifiée par Renato Nobili et Umberto Pensavento en 1995, et mise en 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 ensemené 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.

 ART & SCIENCE

Léonard et la formule de l'arbre

Léonard de Vinci avait identifié une règle portant sur les diamètres des branches d'un arbre. Des modèles numériques la valident et montrent qu'elle correspond à la meilleure résistance au vent.

Loïc MANGIN

Léonard de Vinci a toujours eu le souci du réalisme dans ses œuvres. C'est notamment le cas des arbres qui semblent plus vrais que nature, par exemple dans *L'Adoration des Mages*, conservée à Florence, ou dans différents dessins (*voir la figure page ci-contre*). Pour parvenir à ce degré de réalisme, il s'est nourri d'observations qui l'ont conduit à formuler une hypothèse. On peut la lire dans *Les carnets de Léonard de Vinci* (*page ci-contre, des croquis sont présentés dans les cartouches*) : les branches d'un arbre, à quelque hauteur que ce soit, ont, quand elles sont rassemblées, la même section que le tronc. En d'autres termes, quand une branche de diamètre D se subdivise en N branches secondaires de diamètres d_i (i varie de 1 à N), la relation suivante est vérifiée : $\pi D^2/4 = \pi d_1^2/4 + \pi d_2^2/4 \dots + \pi d_N^2/4$. De façon plus concise, on peut écrire $D^\Delta = \sum d_i^\Delta$ pour i variant de 1 à N et, ici, $\Delta=2$.

Cette règle, dite de Léonard, est utilisée dans la plupart des programmes informatiques lorsqu'il s'agit de représenter un arbre réaliste. Pour autant, cette règle empirique est-elle vérifiée ? Peu de spécialistes s'y sont intéressés, mais parmi ceux qui ont testé l'hypothèse de Léonard de Vinci, le plus célèbre est le mathématicien français Benoît Mandelbrot. En compilant les quelques études disponibles, il a montré que, pour de nombreuses espèces d'arbres, l'exposant Δ est légèrement inférieur à 2. Les observations donnent donc raison à Léonard de Vinci. Toutefois, qu'exprime la valeur de cet exposant ? Hasard évolutif ou loi physique ?

Dans les années 1960 et 1970, deux modèles ont été élaborés pour rendre compte

de la règle. Le premier postule que les arbres sont des faisceaux de vaisseaux identiques courant des racines aux feuilles. Dans ce cas, les branches secondaires résulteraient d'une division du bouquet de vaisseaux de la branche mère. La règle de Léonard devient alors une évidence, puisqu'il y aurait autant de vaisseaux, de diamètre identique, avant et après la bifurcation.

Le second modèle est fondé sur l'idée que, dans un arbre, la déflexion d'une branche secondaire par rapport à sa branche mère,

Le diamètre des branches est une conséquence de l'adaptation de l'arbre au vent.

sous l'effet de son propre poids (et donc de son diamètre), est identique du tronc aux plus fines brindilles. Toutefois, ces deux modèles résistent mal à l'analyse. Par exemple, dans les grosses branches et le tronc, seuls cinq pour cent de la section d'une branche sont dévolus aux vaisseaux conducteurs de sève, et non la totalité comme le suppose le premier modèle. Le second n'est étayé par aucun argument évolutionniste.

Christophe Eloy, de l'Université d'Aix-Marseille, propose une autre explication, de nature structurelle. Selon le physicien, la clef de la règle de Léonard réside dans la résistance de l'arbre au vent. Pour le montrer, il a tenté, dans une sorte de processus d'ingénierie inverse, de construire

une structure arborescente avec le moins de matière possible (on suppose que l'arbre économise ses ressources) et qui résiste le mieux au vent. D'abord, cette structure doit être fractale, avec une dimension comprise entre 2 et 3, ce qui correspond à ce que les botanistes connaissent de l'architecture des arbres. Elle s'explique par la nécessité de capter le maximum de lumière avec le minimum de matière. Cette nature fractale impose les longueurs de chaque branche. Le physicien a également supposé que la résistance à la rupture par le vent est uniforme dans tout le végétal.

Ce modèle d'arbre a ensuite été soumis à un vent virtuel de façon à tester sa résistance. Ce souffle crée des forces de traînée sur chaque branche et entraîne, au-delà d'un seuil, leur rupture. Pour un vent donné, la seule variable était l'épaisseur des branches que l'on a modifiée afin d'obtenir l'arbre le plus robuste. Au final, on retrouve bien la règle que Léonard avait déduite de ses observations ! Le diamètre des branches est une conséquence de l'adaptation de l'arbre au vent.

Ce phénomène de croissance adaptée aux contraintes mécaniques est nommé thigmomorphogenèse par les botanistes. Les arbres dissymétriques qui poussent dans des régions où le vent est unidirectionnel et fréquent, notamment en bord de mer, en sont de bons exemples. Comme le soutenait Léonard de Vinci : « Dans la nature, tout a toujours une raison. » ■

Ch. Eloy, *Leonardo's rule, self-similarity and wind-induced stress in trees*, *Physical Review Letters*, à paraître, 2011.