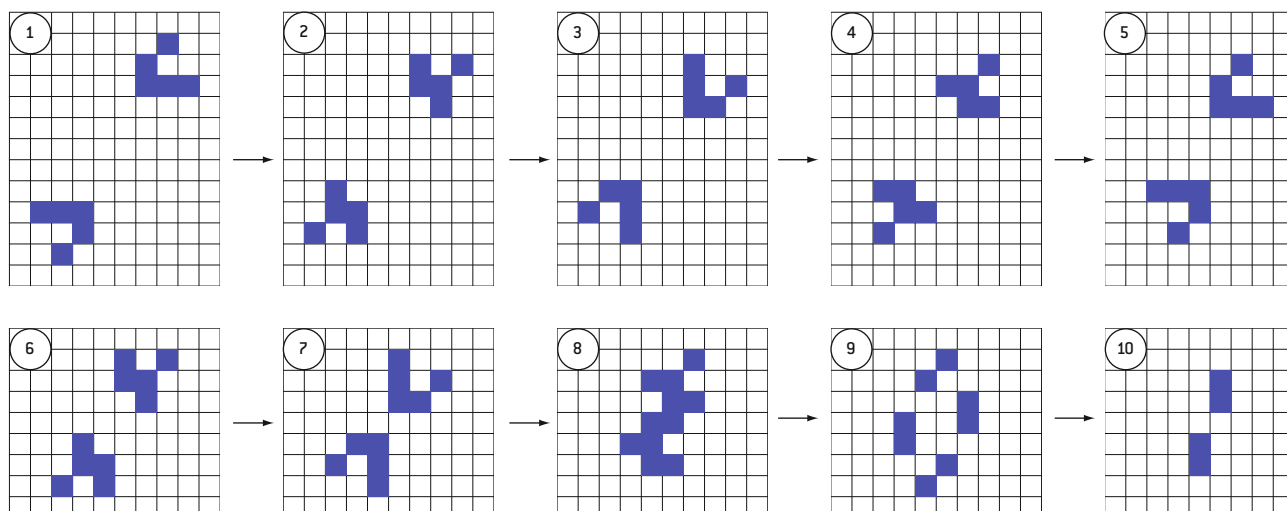




2. JOHN VON NEUMANN A UTILISÉ LES AUTOMATES CELLULAIRES pour démontrer la possibilité de l'autoreproduction. Chaque case (ou cellule) carrée d'un damier infini porte le même petit automate. Cet automate peut être dans un état pris parmi un nombre fini d'états fixés à l'avance. L'évolution se fait selon 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'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.

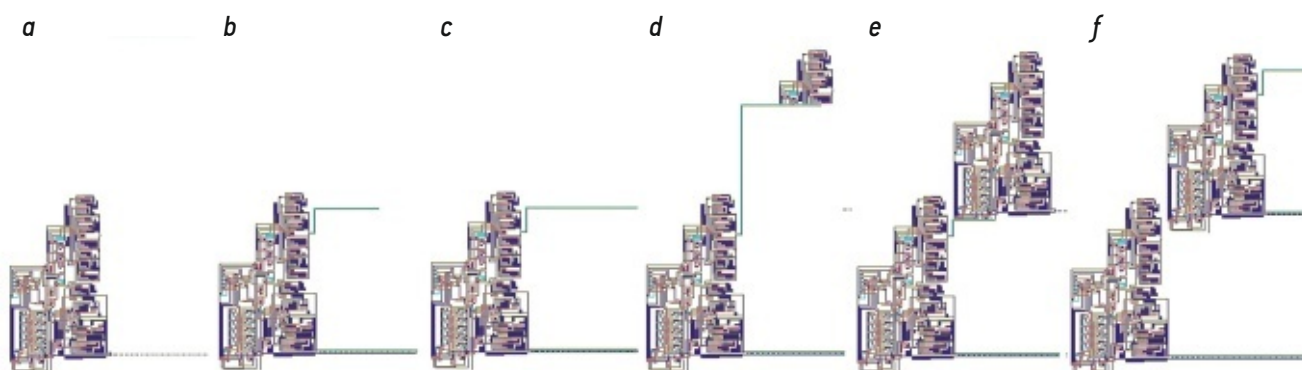
Un cas tout à fait extrême d'autoréplication physique de structures complexes et n'ayant rien à voir encore avec la biologie est celui proposé par Hugh Everett qui, dans sa théorie des mondes multiples, imagine que l'univers dans sa totalité s'autoréplicque à chaque instant.

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 autoréplicatrice, 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.