

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'autorépliques 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.*

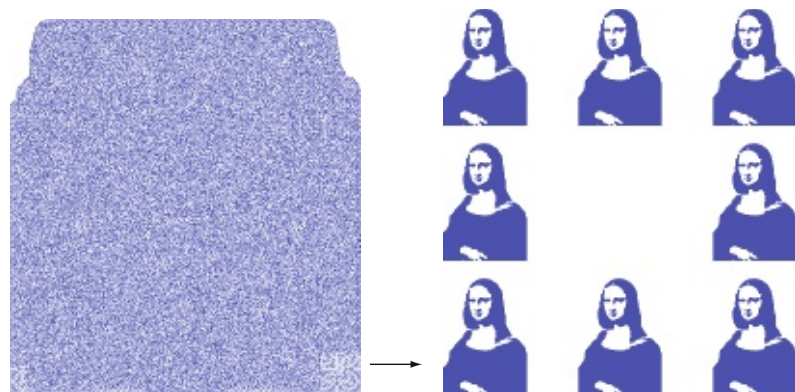
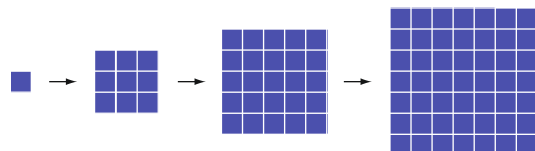
## Réplication évidente

Quand les autorépliques 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 :

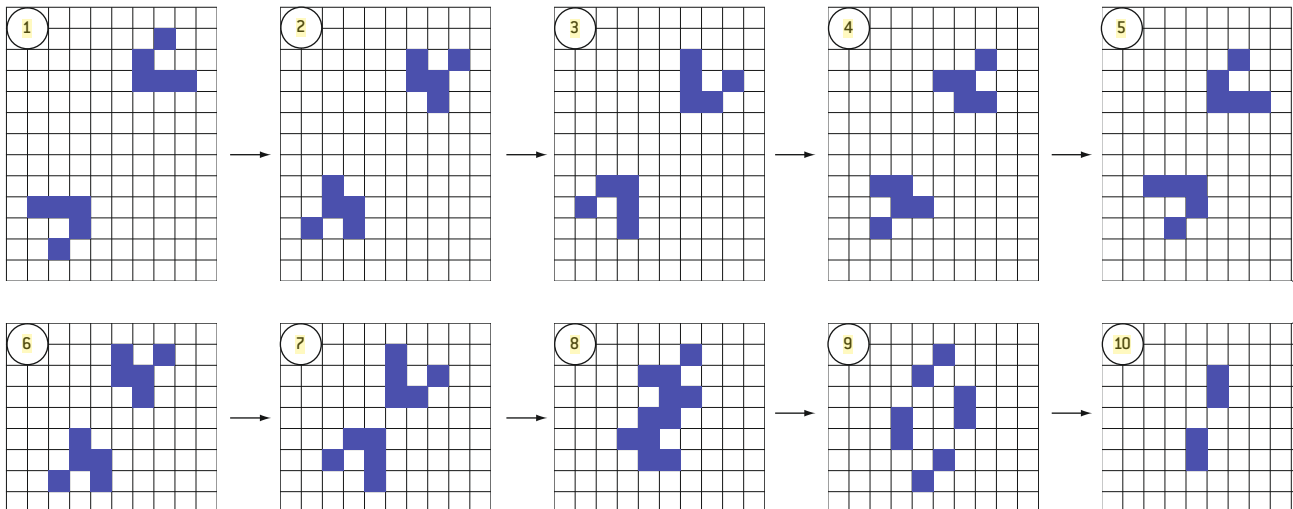
– Une cellule peut être dans l'état mort (*blanc*) ou dans l'état vivant (*bleu sur l'illustration ci-dessous*).

– 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.