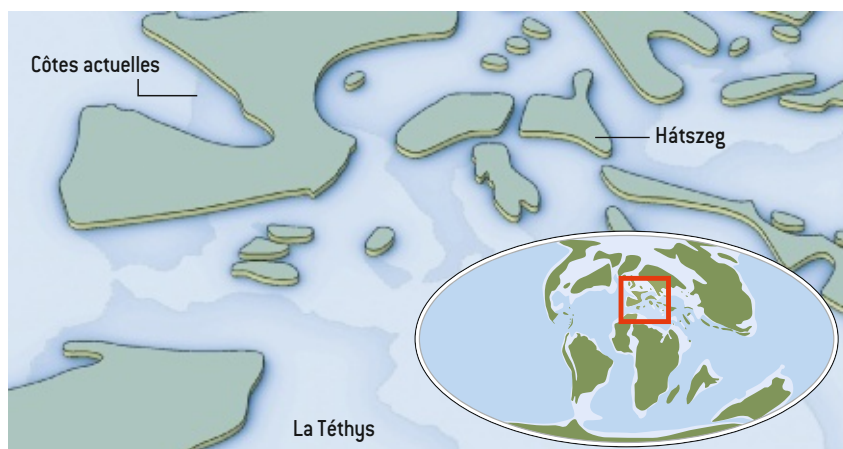


de Hâtszeg en particulier, seront probablement déterminants pour comprendre la répartition globale des dinosaures juste avant leur apogée, il y a 65 millions d'années.

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 émerger 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 &amp; 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.

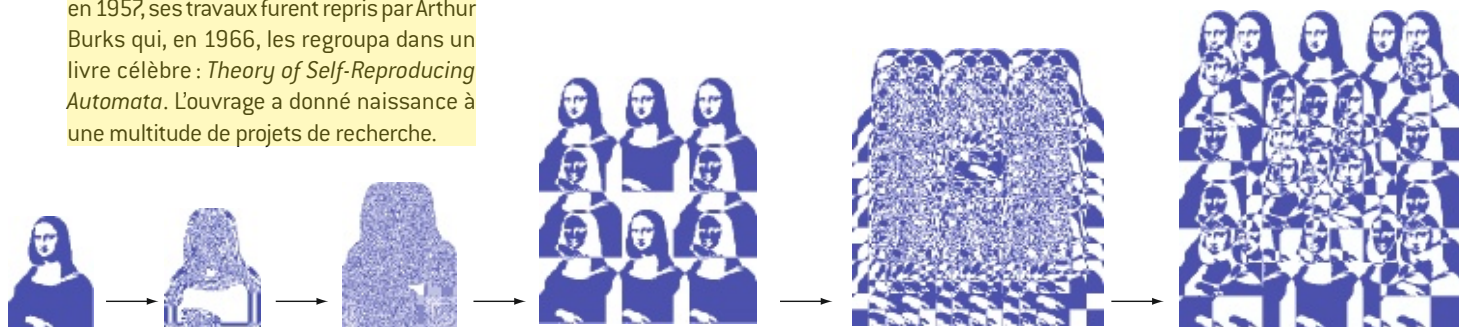
Von Neumann cherchait à démontrer la possibilité d'un robot autoréplicateur et Stanislas Ulam lui suggéra d'étudier le problème dans un monde abstrait simplifié. Le modèle retenu, aussi élémentaire que possible, fut celui des automates cellulaires. Ces calculateurs abstraits élémentaires pavant un damier 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'autorélications 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.*

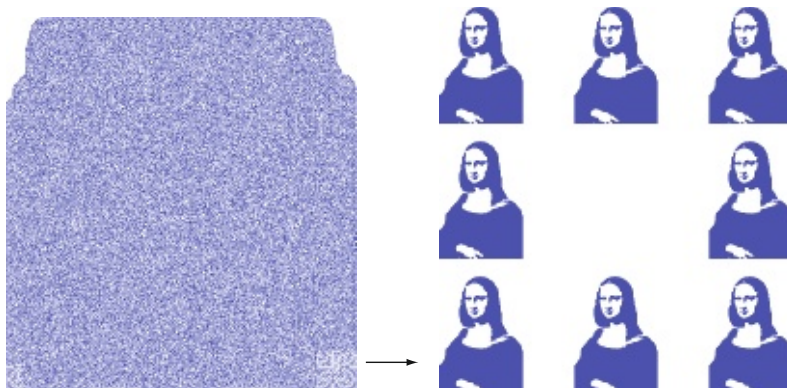
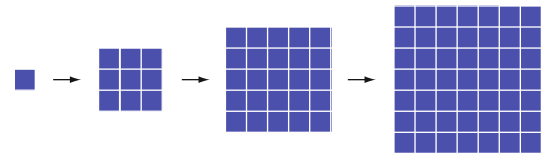
## Réplication évidente

Quand les autorélications 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.