

## 2 - *Émergences* (Automates cellulaires)

---

Note : cet extrait a pour objectif de donner un aperçu du chapitre. Les indications de page correspondent à la place dans le chapitre, elles sont là à titre indicatif. Ces extraits sont épars, le lecteur peut se référer à la table des matières pour se faire une idée des parties manquantes. La conversion PDF utilise des fichiers bitmaps, la qualité des illustrations s'en ressent.

*« Les méfaits de la sur-spécialisation ! marmonna Seldon, presque pour lui-même, qui découpe la connaissance en un million de fragments pour la laisser toute sanguinolente...<sup>1</sup> »*

*La méthode analytique, celle qui découpe et décompose, domine la Science depuis des siècles. Les évolutions récentes, tant techniques que conceptuelles, ébranlent cette hégémonie. C'est maintenant à partir des idées de rassemblement de composants, d'analyse des interactions entre eux que l'on cherche à comprendre la réalité. Au cœur de cette démarche se trouve l'idée d'émergence.*

---

1. ASIMOV I., *Prélude à Fondation*, Paris, Omnibus, 1998, p. 73.

Samedi 31 juillet au matin. La famille TABASCO s'apprête à jouir de vacances longtemps attendues. À l'arrivée sur l'autoroute un panneau indique Cannes à 600 kilomètres. Le plus jeune fils, toujours nerveux et impatient en voiture, s'enquiert du temps nécessaire au parcours. « Nous roulons à 100 km/h, nous devrions donc arriver à Cannes dans six heures » l'informe son père.

Pour arriver à cette conclusion, le père a suivi un raisonnement élémentaire et évident que nous pratiquons tous. Considérant son véhicule, il a simplement pris en compte la distance à parcourir et sa vitesse — soit la distance parcourue par unité de temps — et résolu l'équation suivante :

$$t = \frac{d}{v}$$

Le temps  $t$  est égal au rapport entre la distance à parcourir  $d$  et la vitesse  $v$ . Sur la base d'une donnée (la distance) on s'est ainsi contenté de considérer un paramètre unique, lié au véhicule : la vitesse.

Une heure plus tard l'inévitable se produit : notre famille rencontre un bouchon ou à tout le moins un fort ralentissement. La voiture s'arrête quelques instants, puis repart à vitesse réduite sur quelques mètres, est de nouveau arrêtée plus longtemps cette fois, puis repart, etc... Prenant conscience du caractère extrêmement heurté et chaotique de leur progression, le jeune fils comprend que cet événement remet en cause l'estimation précédente et réitère sa question. « Je ne sais pas, je n'ai pas assez d'informations. » s'entend-il répondre.

En effet, la vitesse du véhicule ne dépend plus seulement de paramètres propres, elle est maintenant fonction du comportement *global* de cet ensemble que constitue le bouchon. De nombreux modèles existent pour déterminer ce comportement <sup>1</sup>. Ils font appel à des grandeurs comme :

- une fonction exprimant le nombre de véhicules par unité d'espace (densité) :  $k(t, x)$  où  $(t, x)$  représente un espace-temps ;
- une fonction exprimant le nombre de véhicules passant à un endroit donné par unité de temps (débit) :  $q(t, x)$ .

Ici, on ne fait plus référence à la vitesse d'un véhicule donné, on tient compte d'un comportement général exprimé à travers des grandeurs globales.

Plusieurs heures plus tard, la famille TABASCO est enfin arrivée sur son lieu de villégiature. Fatigués, ils prennent rapidement un en-cas et se précipitent au lit. Le lendemain matin, arrivant le premier dans la cuisine, le jeune fils découvre une multitude de fourmis affairées à nettoyer les reliefs du repas de la veille. Examinant le phénomène de plus près, il voit une colonne montante, se dirigeant vers la table et une colonne descendante où l'on transporte des fragments de nourriture en direction d'un trou à la base d'un mur extérieur, a priori une entrée de la fourmière. Intrigué, il y dépose une brindille l'obstruant partiellement. Très vite, une fourmi s'en empare, tire, pousse, mord, parvient à déplacer légèrement la brin-

---

1. La principale modélisation du trafic automobile repose sur la dynamique des fluides.

dille. Un moment plus tard, elles sont trois puis cinq, dix, acharnées sur l'obstacle qu'elles finissent par repousser hors du chemin.

Aucune fourmi (et certainement pas la reine) n'est capable par elle-même d'organiser un tel système de recueil de ressources. Les capacités de communication de ces insectes et le jeu des comportements individuels élémentaires sont à l'origine de cette organisation. En fait, l'individu qui a trouvé la source de nourriture a laissé une trace odorante (phéromone) tout au long de son chemin de retour, cette trace a attiré de nouveaux individus qui l'ont eux-mêmes renforcée, etc... formant ainsi une boucle de rétroaction positive. De même, les mouvements de la fourmi qui s'est attachée à la brindille ou, là encore, d'éventuels signaux chimiques, ont amené d'autres individus à la rescousse. Ces mécanismes dits « stigmergiques <sup>1</sup> » sont si efficaces qu'ils sont utilisés comme outil général d'optimisation <sup>2</sup>.

Ces deux exemples montrent qu'il est des cas fréquents où l'analyse des comportements individuels ne permet pas de connaître le comportement global, c'est l'essence même de l'émergence.

---

Page : 17

## Le Jeu de la Vie

J.H. CONWAY est un mathématicien anglais né en 1937 qui a passé l'essentiel de sa carrière à l'université de Cambridge. Il a construit sa réputation grâce notamment à ses travaux sur la théorie des nombres et sur la théorie des groupes.

À la fin des années soixante, CONWAY s'est intéressé aux travaux de VON NEUMANN concernant les automates autoreproducteurs et les automates cellulaires. Pour lui, il devait être possible de réaliser un automate cellulaire beaucoup plus simple que celui de l'auteur hongrois tout en ayant des capacités de calcul universel au sens de TURING. Un de ses souhaits était : « [de] voir un animal autoreproducteur (...) affichant un comportement intéressant. Au sens faible, vivant <sup>3</sup>. » Après deux ans de travail, d'essais et d'erreurs (ne disposant pas d'ordinateur puissant, il a dû tester ses configurations avec un jeu de Go), il a abouti à ce que l'on connaît maintenant sous le nom de *Jeu de la Vie* (*Game of Life*). La publication de la description de ce « jeu » en Octobre 1970 par Martin GARDNER, qui

---

1. La stigmergie désigne un mode de coordination des tâches basé sur des procédures de communications indirectes via des modifications de l'environnement, voir p. 220.

2. Voir notamment : BONABEAU E., DORIGO M., THERAULAZ G., « Inspiration for Optimization from Social Insect Behaviour », *Nature*, Vol 406, 6 July 2000, pp. 39-42. C'est un sujet que nous aborderons plus longuement par ailleurs (voir le chapitre "Distribution et biomimétisme", page 209)

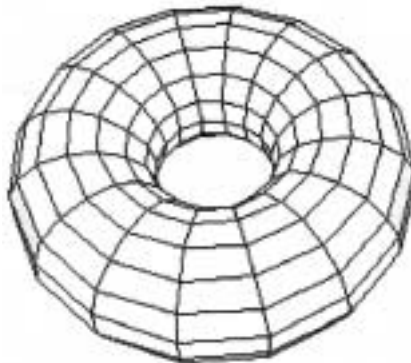
3. LEVY S., *Artificial Life. The Quest for a New Creation*, Penguin Books, 1992, p. 51.

tenait la chronique Jeux Mathématiques du magazine *Scientific American*, est à l'origine de son explosion médiatique. Le succès a été immédiat et fulgurant. L'informatique, alors dans son enfance, se répandait rapidement dans les universités et autres centres de recherche. De très nombreux scientifiques et étudiants ont ainsi pu commencer à en tester les différentes configurations. Cette vogue a été si importante qu'en 1974, *Time Magazine* a titré sur les millions de dollars dépensés et gaspillés en temps processeurs par ces « hordes grandissantes de fanatiques <sup>1</sup>. » On a même dit parfois que le moniteur graphique a été inventé d'abord pour permettre aux fanatiques de visualiser leurs créations !

La présentation du Jeu de la Vie — qui n'est pas du tout un jeu au sens habituel du terme — va nous permettre de matérialiser et mieux comprendre ce que sont les automates cellulaires.

À l'instar des « espaces cellulaires » de S. ULAM, le Jeu de la Vie se présente sous la forme d'un espace à deux dimensions : une feuille quadrillée. Il s'inscrit donc dans un espace *discret*, c'est-à-dire que chaque cellule occupe une zone donnée et strictement délimitée de l'univers de l'automate. Dans la pratique, il est fréquent que l'on connecte les bords de la feuille quadrillée : le nord touche le sud et l'est touche l'ouest. On obtient alors un espace en forme de tore — une sorte de chambre à air — qui n'a donc pas de frontière ou de bordure.

Figure 2-1 : Un tore



Là encore, chaque cellule peut prendre deux valeurs qu'on peut assimiler pour les besoins de l'exposé au couple vie/mort, ou actif/inactif. Le Jeu de la Vie est basé sur seulement trois règles élémentaires :

- *R1* : Une cellule morte entourée d'exactly trois cellules vivantes « naît » ;

---

1. WARD M., *Virtual Organisms. The Startling World of Artificial Life*, New-York, Thomas Dunne Books, St Martin Press, 2000, p. 72.


- R2 : Une cellule vivante entourée de deux ou trois voisines actives reste en vie ;
- R3 : Dans tous les autres cas, la cellule « meurt » ou reste inactive.

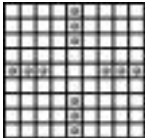
On peut dire que la naissance nécessite le rassemblement de trois congénères et que les cellules meurent d'isolement (moins de deux voisines) comme d'étouffement (plus de trois voisines).

---

Page : 23

On a vu que l'émergence observationnelle au sens de BAAS suppose que les propriétés observées au niveau global ne soient pas calculables, qu'il n'existe pas d'algorithme permettant de les déduire de notre connaissance des agents élémentaires. La notion d'imprévisibilité est donc centrale.

Considérons une figure simple, le *T-tétramino* : . Après dix générations, on obtient en ensemble de quatre oscillateurs connu sous le nom de *feux clignotants* (traffic light) :



Ajoutons maintenant à notre *T-tétramino* une cellule juste en dessus de l'extrémité de la ligne du haut. On obtient alors une figure célèbre, le *R-pentomino* :



Cette structure a été découverte très tôt dans l'histoire du Jeu de la Vie. Au début, ne disposant pas d'ordinateurs pour en tester l'évolution, on s'est interrogé sur son éventuelle croissance infinie. La surface du plateau de Go utilisé à l'origine se révélant vite insuffisante, CONWAY et ses collègues ont du poursuivre l'étude du développement du *R-pentomino* sur des feuilles quadrillées posées à même le sol. C'est à cette occasion que Richard GUY a découvert le planeur<sup>1</sup>. On sait maintenant que le *R-pentomino* évolue durant 1 103 générations avant de se stabiliser sous la forme de six planeurs et dix-neuf blocs de six formes différentes (huit blocs de 2x2, deux nids d'abeilles...).

Une modification mineure de notre configuration de départ s'est traduite par un comportement complètement différent. D'une configuration se stabilisant très rapidement on est passé à une configuration au sujet de laquelle la question de la croissance infinie a pu se poser. Comment aurait-on pu prévoir cela ?

Pour préciser ces idées d'imprévisibilité et d'émergence au sein du Jeu de la Vie, nous pouvons nous appuyer sur l'approche de Mark BEDAU<sup>2</sup>. M. BEDAU définit

---

1. LEVY S., *ibid.*, p. 53.

l'émergence ainsi : « L'état macroscopique  $P$  du système  $S$  étant donné les micro-dynamiques  $D$  est *émergent au sens faible* si  $P$  peut être dérivé de  $D$  et des conditions externes de  $S$  mais seulement à partir d'une simulation <sup>1</sup>. » On rejoint ainsi l'approche précédente insistant sur la non réductibilité des propriétés émergentes. Concernant le Jeu de la Vie, M. BEDAU considère les problèmes de génération spontanée de planeurs et de croissance infinie.

On a noté plus haut que le *R-pentomino* engendre six planeurs au cours de son évolution, c'est là un phénomène fréquent. Partant d'un espace peuplé de manière aléatoire, on constatera fréquemment l'apparition de planeurs. Mais il est également fréquent qu'aucun planeur n'apparaisse. À ce jour, il n'existe aucun algorithme permettant de prévoir si une configuration donnée engendrera des planeurs. Il en va de même pour la croissance infinie.

---

Page : 27

*Distribué, parallèle*, produisant des structures *autonomes* dont la description nécessite un *langage spécifique ; irréductible et imprévisible*, le Jeu de la Vie satisfait à l'ensemble des critères de l'émergence. La *surprise* ressentie lorsque l'on assiste pour la première fois à la création d'un planeur, le fait que celui ci va être décrit en termes de vitesse et de direction et nullement en considérant directement les règles de transition, tout ceci satisfait pleinement le *test d'émergence* <sup>2</sup> que l'on a décrit plus haut.

Il se dégage ainsi clairement que Le Jeu de la Vie comme une foule d'autres automates cellulaires présente de nombreux comportements émergents. Que cette émergence puisse être considérée comme « faible » au sens de BEDAU, n'ôte rien à son efficacité opérationnelle <sup>3</sup>. La conséquence de tout ceci, et il est essentiel de le comprendre ici, est que l'émergence constatée ne provient pas d'un algorithme dédié, ce n'est pas une simulation. Fondamentalement, le comportement des processus émergents rencontrés au sein de l'automate sera de même nature, identique à ce que l'on peut rencontrer au quotidien. En ce sens, ces émergences sont *réelles*. Ce n'est pas parce que le phénomène observé se déroule au sein de l'espace virtuel qu'est l'ordinateur qu'il ne reproduit pas un comportement authentique. De cette réalité découle le fait que les automates cellulaires peuvent être utilisés pour analy-

---

2. BEDAU M.A., « Weak Emergence », *Philosophical Perspective : Mind, Causation and World.*, J. Tom BERLIN ed., Vol 11, Blackwell 1997, pp. 375-399.

1. BEDAU M.A., *ibid.*, souligné par l'auteur. BEDAU oppose son concept d'émergence faible au concept d'émergence forte de O'CONNOR qui insiste sur le caractère bi-directionnel de l'émergence : la macrostructure influe à son tour sur la micro-structure. Sans remettre en cause fondamentalement cette version « forte » de l'émergence, BEDAU considère qu'elle est de faible efficacité opérationnelle à la différence de son approche.

2. RONALD E.M.A., SIPPER M., CAPCARRÈRE M.S., « Design, Observation, Surprise ! A Test of Emergence. », *Artificial Life*, vol 5, n° 3, 1999, pp. 225-239.

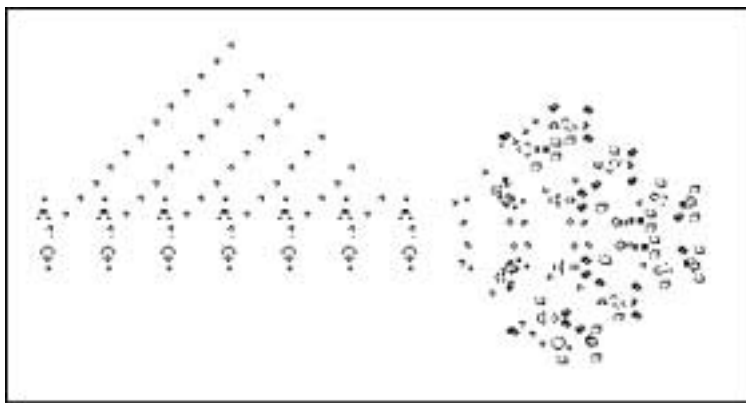
3. Et c'est là un des principaux arguments de Bedau en faveur de son approche de l'émergence.

ser *empiriquement* (puisqu'il n'existe pas de règles de réduction) des phénomènes émergents et c'est bien là l'une des activités essentielles de la Vie Artificielle, mais aussi de nombreux autres domaines scientifiques et en particulier de ceux qui traitent des processus non-linéaires.

« L'univers du Jeu de la Vie est un des exemples les plus frappants qu'on ait pu trouver d'un monde complexe dérivant de prémisses simples<sup>1</sup>. » Nous allons voir maintenant qu'il n'est pourtant qu'un automate cellulaire parmi une infinité, et que cette diversité est porteuse d'une réelle efficacité opérationnelle. Toutefois, avant de quitter CONWAY, nous ne pouvons résister à la tentation de vous présenter deux figures invraisemblables.

Nous avons rencontré un canon à planeur mais il existe un type de configuration beaucoup plus sophistiqué : le « *canons à canons à planeurs* ». Il s'agit bien d'un canon — en fait une forme de locomotive — qui en avançant laisse derrière lui des canons de GOSPER. Pour quiconque s'est intéressé au Jeu de la Vie et a donc été amené à tester l'incroyable diversité des comportements rencontrés, le « canon à canons » reste l'une des choses les plus étonnantes qui se puissent rencontrer (Figure 2-2).

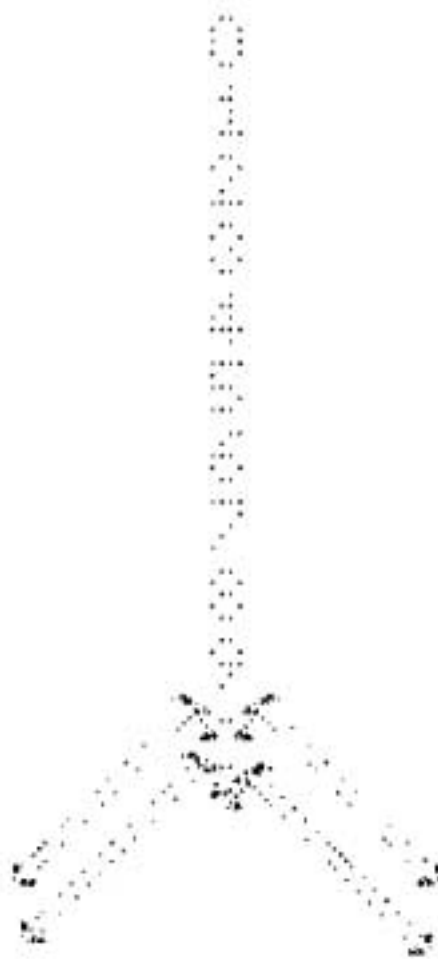
**Figure 2-2 : Le Breeder à la génération 588**



Enfin, on peut citer le *Compteur décimal*. Il s'agit d'un canon de période 2 806 qui produit un ensemble de vaisseaux figurant les chiffres décimaux. Il est représenté ici (Figure 2-3) après 3 025 générations. Cette figure a été conçue par Alan HENSEL en 1994. On a parlé des « hordes de fanatiques », celui qui a conçu une telle configuration doit indéniablement être l'un de leurs maîtres ! Quand vous aurez testé le Jeu de la Vie, pris le temps d'en apprécier la beauté et la complexité, revenez considérer cette figure, vous en goûterez alors toute la saveur.

1. POUNDSTONE W., *The Recursive Universe*, Oxford University Press, 1985, p. 32.

Figure 2-3 : Le *Compteur décimal* de A. HENSEL



---

*Page : 38*

Les automates cellulaires sont donc bien plus qu'un simple « jeu ». Ils représentent un univers spécifique, déterminé, permettant d'analyser le comportement de processus émergents aussi nombreux que variés. Ils suggèrent que la complexité du réel n'est qu'apparence, qu'elle est en fait le résultat des myriades d'interactions élémentaires dirigées par des règles simples. Ils sont d'un large usage, si large que J.H. CONWAY a pu dire au sujet du Jeu de la Vie :

« Sur une échelle suffisamment vaste, vous pourriez vraiment voir des structures vivantes. Réellement vivantes quelle que soit la définition raisonnable que vous donniez à ce terme : évoluant, se reproduisant, se disputant le territoire, devenant de plus en plus intelligentes, écrivant des thèses de doctorat. Sur un espace assez grand, il n'y a pas de doute dans mon esprit que ce genre de choses arriverait <sup>1</sup>. »

Pour certains, dont FREDKIN, il est possible que le monde dans lequel nous vivons soit réellement un automate cellulaire <sup>2</sup>. S. LEVY rapporte ainsi les propos d'un chercheur : « (...) rien ne prouve que cet univers en particulier ne soit pas un automate cellulaire, fonctionnant sur l'ordinateur de quelque magnifique *hacker* au paradis <sup>3</sup>. »

---

1. LEVY S., *ibid.*, p. 58. On n'a jamais vu des structures autoreproductrices émerger spontanément dans le Jeu de la Vie. D'autres automates sont beaucoup mieux adaptés pour réaliser ce genre d'exploit (voir le chapitre "Autoreproduction et Universalité Automates Cellulaires II", page 69).

2. RUCKER R., WALKER D., *Introduction to CellLab*, <http://www.fourmilab.ch/cellab/>.

3. LEVY S., *ibid.*, p. 58.

