

Métaphysique, ontologie, et épistémologie des automates cellulaires¹

*André Ourednik, Université de Lausanne,
Faculté des Lettres, Section de Philosophie, 2004
Séminaire de master en épistémologie et philosophie des
sciences, supervisé par Prof. Michaël Esfeld*

Abstract

In the last decades, triggered by a historical leap in computer technology, a theory bearing the name of “cellular automata” (CA) – founded by von Neuman in the 1950’s – has reacquired rising interest among theoreticians in most research fields of both the natural and the human sciences. The aim of this presentation, after a short recall of the model, is to present some salient aspects of CA’s relevance to philosophy. We shall ask in which new ways the CA allow the philosopher to address some of the main metaphysical and ontological issues. Upon the background of CA, we shall thus briefly examine the opposition between discreteness and continuity, the opposition between movement and immobility, as well as the question of the ontological status of life and of our mental states. Lastly, we shall briefly examine CA from an epistemological point of view.

Le modèle

Un **automate cellulaire** (AC) est un système dynamique, à la fois spatialement et temporellement discret. En tant que système, il peut opérer comme modèle de phénomènes naturels, allant de phénomènes particuliers au phénomène monde. En soi, il est à la fois nomologiquement et ontologiquement circonscrit par une abstraction algorithmique² dont les trois composantes sont:

- Les **cellules** – *unités spatiales* résultant d’un découpage discret de l’espace.
 - Conceptuellement, la cellule, élément d’un AC, peut représenter tout objet d’un système dont on pense connaître le comportement sans avoir à le décomposer en sous-parties.
 - Typiquement, par commodité de calcul, on travaille avec un "modèle orthogonal régulier"³, les cellules étant alors – en fonction du nombre de dimensions spatiales prises en compte – des segments de ligne, des carrés, des cubes ou des hyper-cubes dans un espace à n dimensions.
- Les **états** des cellules – chaque cellule se trouve dans un *état* particulier d’un ensemble d’états possibles. Cet ensemble d’états possibles est un ensemble fini.

¹ Séminaire «Philosophie de la nature», Université de Lausanne. 13.5.2004

² D’un point de vue plus large, il s’agit d’une «abstraction mathématique». Le «abstraction algorithmique» nous paraît plus spécifique et, ici, mieux adapté.

³ C’est le terme que nous proposons.

- Conceptuellement, on peut assimiler un état cellulaire à une propriété – ou un ensemble de propriétés – d'un point-espace. La question de savoir si ce point ne serait plutôt une région d'espace possédant une étendue sera traitée dans la partie 1.1.
- La **fonction de transition** qui contient un ensemble de règles – logiquement compatibles entre elles – qui déterminent, en fonction de l'état d'une cellule et de celui de ses cellules voisines au temps t , l'état de cette cellule au temps $t+1$.
 - Typiquement, on restreint le voisinage d'une cellule aux cellules adjacentes, c'est-à-dire, à celles qui partagent au moins un point avec la cellule étudiée. Dans ce cas, une cellule dans un espace à n -dimensions a 3^n-1 voisines qui co-définissent son état à la prochaine itération.

En principe, un AC est homogène – toutes ses cellules sont identiques. Ce sont elles qui incarnent les états et leur dynamique déterminée par la fonction de transition. Chaque cellule est ainsi un *automate fini*⁴. Il est possible de dire que chaque cellule est porteuse de l'ordre qui régit la totalité de son univers – la totalité de l'AC, dans le cas des cellules. Pour cette raison, les cellules d'un AC sont parfois comparées aux monades de Leibniz⁵.

L'**ontologie fondamentale** du monde des AC se limite aux trois catégories décrites ci-haut: espace cellulaire, états cellulaires et fonction de transition. Cela même si l'on y introduisait des agents spatiaux⁶ – ceux-ci peuvent parfaitement être réduits à des états et règles cellulaires particulières.

Le concept des AC fait donc preuve d'une grande économie ontologique: Il n'y a pas de substance, uniquement des processus de transmission d'information. Il n'y a pas de matière mais uniquement de l'espace – abstrait – dont les régions arbitrairement circonscrites instancient des propriétés déterminées par les processus. Les lois de l'AC, elles, sont parfaitement connues – le modèle ne recèle aucune dynamique cachée.

Dans les parties 1 et 2 de ce travail, nous voulons examiner quelques phénomènes émergents de cette ontologie limitée, et nous interroger sur la signification métaphysique et ontologique de ces phénomènes ainsi que sur leur façon d'émerger.

⁴ Un **automate fini** est un objet mathématique défini essentiellement par Σ : un *ensemble fini de symboles d'entrée*, par Q : un *ensemble fini d'états* et par $(\Sigma \times Q \rightarrow Q)$: une *fonction de transition des états*. Dans le cas des AC, les symboles d'entrée d'une cellule sont les états des cellules voisines.

⁵ Voir, p.ex., FATÈS [2001].

⁶ Des cellules apparemment «mobiles».

1. Métaphysique et ontologie des AC

1.1. L'univers discret

La première question que l'on peut vouloir se poser face aux AC et à leur ontologie est: "Un modèle discret reflète-t-il le monde?"

Du point de vue métaphysique, la question est aussi ancienne que la philosophie elle-même. Sinon en spéculation, elle n'a jamais été tranchée, et peut donc à juste titre être considérée comme une aporie.

La physique classique, elle, tranche en la matière de façon décidée. Elle présuppose un monde continu et ses équations différentielles sont là pour prouver que, malgré cette prémisse, Achille rattrape la tortue. Cette position peut cependant être remise en question, et cela pour trois raisons de poids.

Tout d'abord, comme l'affirme Tommaso Toffoli⁷, \mathbf{R} , les nombres réels, n'ont de réalité, dans la physique classique, qu'en tant qu'approximations du nombre – discret – de particules en un lieu donné.

"[] The ingredients of our physical world are discrete particles. [] Like misers, all we know how to do is count the particles: when there are too many, we get average densities by weighing them in bulk and dividing the volume. The ratios we get in this way are real numbers"⁸

Dans un bref exposé, Toffoli [1994] est capable de montrer comment des macrophénomènes d'habitude conçus comme continus émergent de microphénomènes discrets. Il invoque des exemples de phénomènes aussi variés que la dynamique des fluides, la propagation d'ondes⁹, la dynamique de milieux excitables (voir Figure 1), le magnétisme, la condensation de l'eau ou l'entropie.

La raison que l'on peut invoquer en faveur d'un univers discret en regard de ces exemples est la suivante:

"Most of the features that one usually associates with physics (forces, pressure, temperature, magnetization etc.) are not present as primitive features in the fined-grained recipe – which just deals with simple discrete tokens. They are derived features, which emerge at a macroscopic level when we start counting, averaging blurring – in sum, looking at populations rather than individuals."¹⁰

Évidemment, ce premier argument de Toffoli ne permet pas de prouver que le monde est en soi discret mais permet d'établir la plausibilité – peut être supérieure – d'un modèle du monde discret par rapport à un modèle continu.

⁷ Proche collaborateur de Edward Fredkin, fondateur, en 1980, de l'Information Mechanics Group au MIT.

⁸ TOFFOLI [1994], 2

⁹ La propagation circulaire ou diagonale causée par des micro-déplacements orthogonaux est l'un des phénomènes émergents le plus fréquemment observés dans les AC.

¹⁰ TOFFOLI [1994], 3

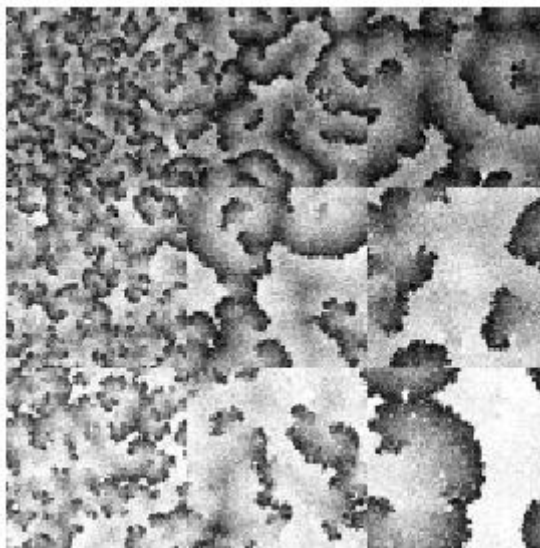


Figure 1: Propagation de feu dans un milieu inflammable. "There are 3 states - ready, firing, and recovering. At time $t + 1$, a ready cell will fire with a probability p close to 1 if any of the adjacent cells was firing at time t . After firing, the cell will go to the recovering state, from which, at each step, it has a probability q to returning to the ready state". L'illustration montre neuf simulations, pour différentes valeurs des paramètres p et q . (Source: Toffoli [1994])

Deuxièmement, du point de vue du calcul infinitésimal, tout phénomène continu peut en principe être décomposé en parties qui se fondent en une continuité dans le cas limite, c'est-à-dire, lorsque leur taille tend vers zéro. Ainsi, dans un cas limite, les régions spatiales instanciant des propriétés – les états – d'un AC, deviennent des points-espace contigus mais dépourvus de dimension spatiale. Une nature fondamentalement discrète de l'espace n'est ainsi pas en contradiction avec la réalisation apostériorique d'un espace continu. C'est d'ailleurs ainsi que la physique classique échappe au paradoxe de Zénon – et non pas dans le sens inverse d'une décomposition d'un espace continu en parties discrètes. La même argumentation peut évidemment être appliqué au temps discret.

Troisièmement, la présupposition d'un monde discret fait preuve d'une plus grande rigueur épistémique. En effet:

*"The problem with differential equations is that the recipe itself is an infinitesimal one, and has to be executed over a set of points having the infinity of the continuum. It's a task for angels, not for men; we can only carry it out in an approximate way."*¹¹

Même l'ordinateur le plus puissant ne peut réellement calculer une équation différentielle. Il en fait toujours une approximation, découpant la courbe d'une équation en segments extrêmement – mais jamais infiniment – petits. De plus, si la courbe – qui circonscrit une surface dont nous voudrions calculer le volume dans une équation différentielle – est le produit d'une expérience empirique, elle n'est courbe que par approximation inductive. En réalité, elle ne peut être qu'une succession de points, mesurés à des intervalles *discrets*, aussi infimes soient-ils. De ce point de vue, la présupposition d'un monde discret ne relève pas seulement

¹¹ TOFFOLI [1994], 2

d'une approche nouvelle ou originale, mais surtout d'une honnêteté méthodologique.

En vue de ces trois arguments, même si nous convenons du fait que le problème métaphysique de la nature discrète ou continue du monde ne peut être tranché par l'élaboration d'un modèle ontologique artificiel, il est possible, de par la plausibilité d'un tel modèle, de mettre en doute la position de la physique classique, qui entend avoir tranché la question.

1.2. Le temps et l'espace

Remarquons brièvement qu'en principe, un AC ne nous oblige pas à conserver le temps et l'espace en tant que deux catégories ontologiques distinctes. Les deux peuvent, en fait, être fondues en une seule: l'*espace-temps*. La catégorie indépendante du temps disparaît si nous ne considérons ce dernier que comme une variable parmi d'autres dans la fonction de transition. Ainsi, par exemple, une fonction de transition "atemporelle" serait formulée dans les termes suivants:

- Une cellule située en $([x, y, z] = [i, i, (i + 1)])$ se trouve dans l'état q_j si plus de n cellules de l'ensemble $([x, y, z] = [(i - 1), (i + 1), i], [i, (i + 1), i], [(i + 1), (i + 1), i], [(i - 1), i, i], [(i + 1), i, i], [(i - 1), (i - 1), i], [i, (i - 1), i], [(i + 1), (i + 1), i]])$ se trouvent dans l'état q_k .

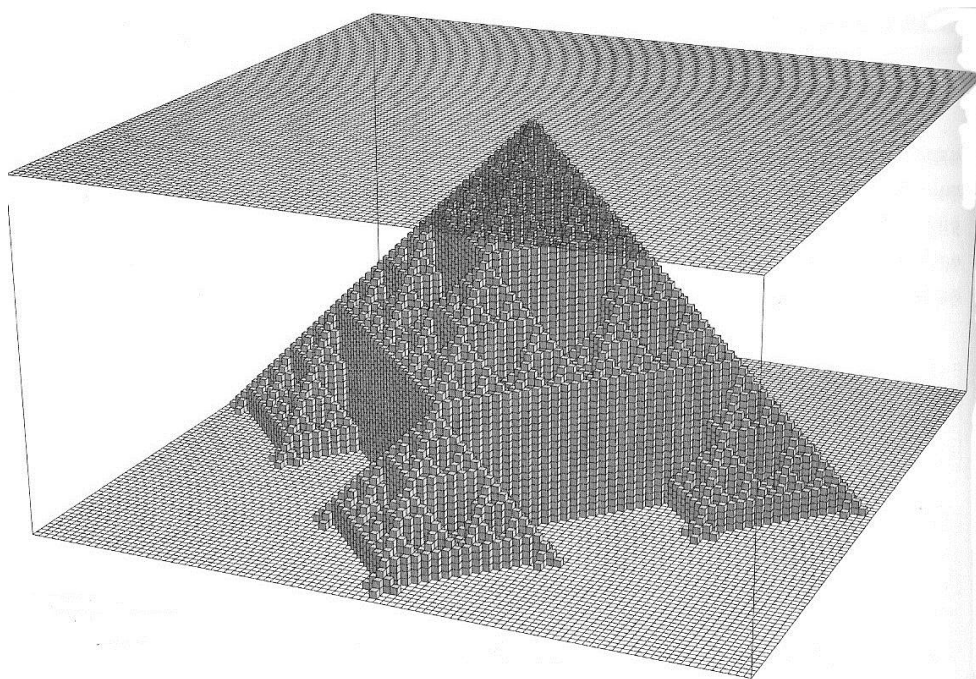


Figure 2: Structure cellulaire spatio-temporelle, instanciant une fonction de transition particulière. Les couches synchroniques de l'espace (2D) sont disposées en plans horizontaux, l'axe diachronique est vertical. Le temps "progressé" de haut en bas. (Source: Wolfram [2001], 172)

Le nombre de dimensions prises en compte dans une formulation de ce genre est libre, dans la mesure où il dépasse zéro. Si, à la formulation de la fonction de transition, nous ajoutons une condition initiale – la cellule $[x, y, z]$ est active, p.ex. – nous obtenons une **forme spatio-temporelle** qui réalise la fonction (ex.: Figure 2).

1.3. Mouvement et persistance des objets

Au cas où nous conserverions tout de même la distinction entre les catégories espace et temps, nous conservons également une question philosophique majeure, qui est celle de la persistance des objets se déplaçant au sein de l'espace et du temps.

Un AC bien adapté à explorer cette question est le "**jeu de la vie**" du mathématicien John Horton Conway. Le modèle a deux états, 0 et 1, et la fonction de transition qui régit sa dynamique peut être décrite ainsi:

- Indépendamment de son état, une cellule dont trois, de ses huit voisines, sont dans l'état 1 au temps $t-1$ adopte l'état 1 au temps t .
- Une cellule possédant deux voisines dont l'état est 1 au temps $t-1$ demeure, au temps t , dans l'état qu'elle avait au temps $t-1$.
- La cellule adopte l'état 0 au temps t dans tous les autres cas.

Ce modèle, développé en 1969, a cela de particulier qu'il produit de nombreuses formes persistantes qui – de plus – ont été largement étudiées durant des années de recherche en AC¹². Ces formes peuvent être classifiées en trois types distincts.

Nous avons d'abord les **formes stables** (Voir, p.ex., Figure 3). Ces formes persistent dans le temps, à moins d'être dérangées par d'autres formes émergentes du système, tel des glisseurs.

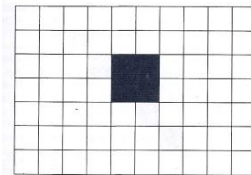


Figure 3: Jeu de la vie - forme stable. (Source: Dennett [1995], 169)

Deuxièmement, nous avons des formes cycliques, des "**oscillateurs**" qui persistent, eux aussi, dans le temps, mais dont la forme varie cycliquement avec le temps. Un oscillateur prend plusieurs formes, toujours dans le même ordre. La longueur du cycle d'un oscillateur correspond au nombre de formes qu'il peut adopter. Cette longueur peut varier. (Voir, p.ex., Figure 4)

¹² Malgré sa simplicité apparente, ce modèle est lui-même résultat d'une longue recherche. Une modification, aussi infime soit-elle, des paramètres de sa fonction de transition donne naissance à des AC inintéressants dont les cellules adoptent, soit toutes l'état 1, soit toutes l'état 0.

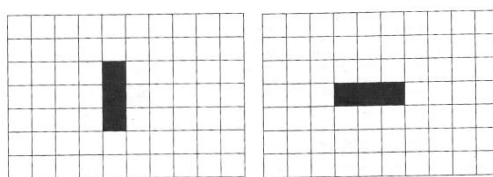


Figure 4: Jeu de la vie – Deux phases d'un "oscillateur" avec une longueur de cycle égale à deux. (Source: Ourednik, 2004 d'après Dennett [1995], 168)

Troisièmement, nous avons de formes mobiles, aussi appelées "**glisseurs**". Celles-ci sont des oscillateurs qui, en plus de retrouver une même forme au bout d'un cycle, accomplissent, en la retrouvant, une translation d'une ou plusieurs cases dans une direction (Voir, p.ex., Figure 5). La direction de la translation peut même varier au cours d'un cycle – il existe des formes qui accomplissent une symétrie axiale horizontale puis verticale, puis ainsi de suite, jusqu'à "revenir" à une position initiale.

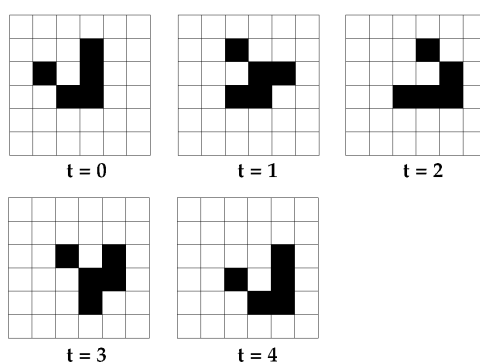


Figure 5: Jeu de la vie - Cinq itérations successives ($t_0 - t_4$) dans l'existence d'un "glisseur". La même forme ressurgit cycliquement toutes les quatre itérations, décalée d'une case vers le sud-est. Ainsi, par exemple, au moment $t = 32$, elle aura "parcouru" une distance de 8 cases dans cette direction. (Source: Ricardo Carretero, <http://www-rohan.sdsu.edu>)

Telles sont les observations que l'on peut facilement faire à l'aide d'une simulation informatique mais une question se pose: les formes ou patterns, observés, décrits et classifiés ci-haut, ont-ils une réalité? Se déplacent-ils réellement?

En effet, du point de vue d'un éliminativisme radical, le mouvement n'existe pas plus que les formes qui l'accomplissent. Il est tout à fait possible d'argumenter en faveur de cette position dans le cadre d'un AC. Il est possible de n'accepter la réalité de rien d'autre que ce qui relève de l'ontologie fondamentale, circonscrite par la description axiomatique du modèle. Les formes observées, stables ou mobiles, ne sont en effet que des manifestations de processus algorithmiques. Si mouvement il y a, il s'agit d'un mouvement d'information qui, elle, n'est incarnée que par les états cellulaires abstraits dont, en plus, seule une *représentation* apostériore rend compte en termes de mouvement. Ainsi, métaphysiquement, la continuité des objets dans l'espace est possible sans déplacement de matière.

Néanmoins, dès que l'on sort du cadre axiomatique des AC, un problème ontologique surgit. En effet, en admettant que seules existent des *propriétés* de points-espace – que l'on peut assimiler à de l'information pure – il est justifié de se demander qu'est-ce, dans le monde physique, qui instancie ces propriétés. Car même dans le cadre informatique, lorsque nous voudrions transformer un pur *Gedankenexperiment* en simulation, l'usage de transistors, de cristaux liquides et d'électrons en mouvement – donc de matière – s'avère incontournable. Plus encore si nous procédions à une simulation à l'aide d'une table de go et de pièces de monnaie, tels qu'elles se faisaient à l'époque de von Neumann.

Cette réflexion nous oblige peut-être à reconnaître une matière dont les particules discrètes rempliraient l'ensemble de l'espace. Elle ne nous oblige cependant d'aucune manière à reconnaître le mouvement, pas plus que la réalité des objets formés de plus d'une particule.

Au vu des AC, l'éliminativisme radical reste donc une position plausible. Il est toutefois également possible d'utiliser le même modèle pour argumenter en faveur d'une ontologie plus étoffée. Nous aborderons ces arguments dans la partie 1.6.

1.4. Le déterminisme

Dans un article examinant la sémiotique des AC, Etxeberria et Ibáñez [1999] font la remarque suivante:

*"The agents and the objects of the computation are the same, and any particular cell oscillates in an endless loop between its roles as an element that processes the environmental information and as a significant part of the environment to be processed by units in the neighbourhood."*¹³

La remarque relève la double nature de toute cellule et vise à identifier le problème de la pertinence, du point de vue sémiotique, de l'application de la notion de calculabilité universelle aux AC. Les cellules d'un AC possèdent cependant une double nature plus fondamentale encore.

Si nous considérons le fait que tout état cellulaire constitue un événement, il est intéressant de voir comment ces événements sont causalement liés. Nous remarquons que tout état cellulaire est à la fois le résultat et la cause partielle des états de ses cellules voisines. Tout état cellulaire se trouve ainsi dans un **enchevêtrement causal** au sein duquel tout élément est à la fois le point d'arrivée et le point de départ de toutes les chaînes causales du monde. Il s'ensuit une relation herméneutique entre le particulier, qu'est chaque cellule, et la totalité, qu'est l'univers de l'AC.

Il se peut qu'un AC soit régi par une fonction de transition déterministe¹⁴ – mais même dans ce cas, au sein de la relation décrite ci-haut, l'enchevêtrement du déterminant et du déterminé élimine la question aporétique du choix entre fatalisme et liberté. Nous pouvons tout au plus parler d'un **inter-déterminisme** ou d'un **déterminisme réciproque** des états cellulaires. Cette réflexion peut facilement être transportée dans le monde physique pour parler d'un inter-déterminisme de tous les événements de ce dernier.

¹³ ETXEBERRIA, IBÁÑEZ [1999], 303

¹⁴ Indépendamment, donc, du fait que des fonctions de transition non-déterministes existent.

1.5. La question du vivant et le seuil de complexité

Pour traiter la question du vivant, telle qu'elle se pose dans le cadre de AC, rappelons-nous tout d'abord les caractéristiques le plus souvent avancées pour le définir:

- Le **métabolisme**: tout organisme vivant est en échange (énergétique) avec son extérieur.
- La **croissance**: tout organisme vivant est capable de croître: d'évoluer et de s'organiser de façon autonome.
- L'**irritabilité**: tout organisme vivant répond à des stimulus externes.
- L'**auto-reproduction**: tout organisme vivant est capable de se reproduire, il peut engendrer de la descendance.

A première vue, ces caractéristiques sont descriptives et n'ont aucune teneur ontologique. Voyons cependant de plus près l'une d'entre elles que le modèle des AC nous permet d'analyser particulièrement bien – l'auto-reproduction.

La recherche de von Neumann – qui aboutit, dans les années 1950¹⁵, à la formulation d'un premier AC – était orienté vers la création d'une **machine auto-reproductrice**. Par "auto-reproduction" n'était pas entendue une auto-reproduction triviale d'un système qui conduirait à une maximisation de son entropie¹⁶ mais à une auto-reproduction qui conserverait, voir augmenterait la complexité du système originel.

Ce qu'il y a d'étonnant dans les résultats de la recherche de von Neumann est que le **système auto-reproducteur** (SAR) fonctionnel, pour sortir d'une impasse logique, doit non seulement comporter un **constructeur universel**¹⁷ (CU) et une **description** de ce même constructeur, mais le CU lui-même doit être capable de distinguer entre une phase d'*interprétation* de sa propre description et une deuxième phase de *copie* de la description. Le CU doit être un CCU, un **constructeur-copieur universel**.¹⁸ Or, ce principe correspond à celui du processus biologique de la méiose, découvert deux années plus tard¹⁹.

¹⁵ La logique de la machine auto-reproductrice fut formulée en 1948 et publiée chez: NEUMANN J. von [1951] «The General and Logical Theory of Automata» In: JEFFRIES L. A. (ed.), *Cerebral mechanisms in Behaviour; The Hixon Symposium*, New York. Le premier AC fut conçu entre 1952 et 1953 et publié chez: NEUMANN J. von [1966] *Theory of Self-Reproducing Automata*. A. W Burks: Urbana.

¹⁶ Tel est le cas, en effet, de l'écrasante majorité d'AC's possibles. Ecrasante dans l'ordre de $1/x$, avec $x \rightarrow \infty$.

¹⁷ Un **constructeur universel** est un objet mathématique capable de produire, à partir d'une description donnée, n'importe quel objet, y inclus soi-même.

¹⁸ Il s'agit, ici, du problème de la **régression à l'infini**. En effet, un SAR constitué d'un CU simple et de sa description ne sera capable de se reproduire qu'une seule fois:

$$\text{SAR} = \text{CU} \times \text{Desc}(\text{CU})$$

$$\text{CU} \times \text{Desc}(\text{CU}) \rightarrow \text{CU} \text{ [la flèche indique le résultat de la production]}$$

Donc:

$$\text{SAR} \rightarrow \text{CU}$$

La description du CU, nécessaire à une reproduction ultérieure disparaît ici dès la première reproduction. Afin que l'automate puisse se reproduire à l'infini, sa description devrait donc contenir non seulement une description du CU mais une description du SAR dans sa totalité. Ceci pose un problème mathématique évident dans la formule suivante:

$$\text{SAR} = \text{CU} \times \text{Desc}(\text{SAR})$$

La description ne peut pas contenir la description de la description de la description ... Pour résoudre ce problème, le CU doit contenir une instance de supervision capable de distinguer entre l'interprétation et la copie de la description. Le CU doit être un CCU. Voir FATÈS [2001], 7 ainsi que ETXEBERRIA, IBÁÑEZ [1999], 306.

¹⁹ Publié chez: WATSON J. , CRICK F. [1953], «Genetic implication of the structure of deoxyribonucleic acid» In: *Nature* (171), pp. 964-967.

Avec les seuls éléments existants dans un AC, c'est-à-dire, avec l'ontologie réduite que nous avons décrite, von Neumann réussit à construire un tel CCU, c'est-à-dire, une machine capable d'auto-reproduction au sein de son monde.²⁰

En considération de ce résultat, aussi bien que de ce que nous avons vu sur la continuité de l'objet, il serait possible d'affirmer que ce que, dans un AC, nous appelons "vivant" – ou du moins « auto-reproducteur » – demeure du même niveau ontologique que ses composantes cellulaires. Cette ontologie, en tant que façon de concevoir ce qu'il y a, peut être rapportée au monde physique réduisant ce dernier aux composantes primitives dont il est fait. Une telle réduction peut cependant être sérieusement remise en question par l'introduction de l'idée d'un **seuil de complexité** du vivant.

Déjà Neumann relevait l'existence d'un seuil de complexité en deçà duquel les systèmes auto-reproductifs se dégradent²¹ en quelques générations. Des recherches ultérieures ont démontré que ce seuil est très élevé, du moins dans le cas du CCU. Selon W. Poundstone²², l'ordre de grandeur d'un système auto-reproducteur, réalisant un CCU au sein d'un Jeu de la Vie de Conway, serait de l'ordre de 10^{13} pixels organisés d'une façon complexe et précise. Et c'est bien en cela que réside une particularité ontologique du vivant.

Dennett [1995] attire l'attention sur le fait que l'émergence d'un tel système est plus que hautement improbable. A cela s'ajoute le fait que la fonction de transition du Jeu de la Vie est elle-même une fonction possible parmi une infinité d'autres. Un système auto-reproducteur, dans le sens d'un CCU formulé au sein du Jeu de la Vie, ne peut pas résulter du hasard. Comment la nature a-t-elle fait pour dépasser ce seuil de complexité? L'improbabilité d'un tel dépassement laisse, dans un premier temps, émettre l'hypothèse d'une volonté extrinsèque, de l'existence d'un créateur – de Dieu, en bref. Et Dieu, à lui tout seul, réalise la catégorie ontologique du vivant, ainsi que bien d'autres catégories. Arrêter l'argument ici serait cependant trop simple.

La question se pose donc, comment dépasser le seuil de complexité sans un créateur de lois cellulaires et de configurations initiales. Comme réponse possible, Dennett avance la thèse de Smolin²³, selon laquelle il y aurait une "sélection naturelle d'univers". Selon cette thèse, les trous noirs seraient les lieux où de nouveaux Univers naissent. Plus un univers en a, plus il aurait de "descendance". Ce fait avantagerait les Univers dont les constantes et lois physiques permettent la formation de trous noirs. Il se fait que la formation de tels phénomènes dépend de la possibilité de la formation du carbone qui se trouve, entre autres, être un élément de base du vivant. D'où un avantage évolutionniste d'univers dont les lois permettent la formation du carbone et, par conséquent, du vivant.

Comme annonce Dennett lui-même, la thèse est très spéculative et demande à être vérifiée. Néanmoins, elle constitue une réponse métaphysiquement plausible à la question "Quoi d'autre que Dieu *pourrait* expliquer le franchissement du seuil de complexité?"

²⁰ Le choix de von Neumann de construire une machine auto-reproductrice au sein d'un AC plutôt qu'au sein du monde physique relève uniquement de considération de l'ordre de la faisabilité technique. Conceptuellement les cas sont équivalents: une machine faite d'éléments d'un AC qui s'auto-reproduit dans un AC équivaut à une machine faite d'éléments de l'univers qui s'auto-reproduit dans l'univers.

²¹ Voir ETXEBERRIA, IBÁÑEZ [1999] 295, 300 etc.

²² POUNDSTONE W. [1985] *The Recursive Universe: Cosmic Complexity and the limits of scientific knowledge*. New York: Morrow. Cité dans DENNETT [1995], 173

²³ SMOLIN L. [1992] «Did the Universe Evolve» In: *Classical and Quantum Gravity*, (9), pp. 173-19. Mentionné par DENNETT [1995], 177

Au cas où ne ne voudrions pas prendre en considération la thèse spéculative de Smolin, nous pouvons également considérer une thèse plus faible qui se base sur l'éternité de l'univers. Selon cette thèse, nous pouvons partir du principe que l'éternité est un temps suffisamment long pour permettre à toutes les lois et constantes de l'univers d'avoir lieu. Si, comme argumente Empédocle – ou, plus tard – A. Wheeler (1974)²⁴, l'univers oscille dans un cycle de Big Bangs et de Big Crashes, il se peut qu'au cours de l'éternité, un parmi l'infini des Big Bangs produise un univers dont les lois font émerger la vie.

“Each possible setting is tried an infinity of times, and so every variation on every theme, both those that 'make sense' and that are absurd, spins itself out, not once, but an infinity of times”²⁵

Telle est l'antique thèse de l'Éternel Retour. La question de la Volonté de Puissance, dont cette thèse est la prémisse, ne peut certainement pas être tranchée dans notre exposé, moins encore la question de Dieu ou celle de la descendance de l'Univers. Néanmoins, l'apparemment nécessaire introduction de tels concepts, provoquée par l'existence du seuil de complexité nous confirme dans le caractère de **discontinuité ontologique** de ce dernier.

Ce qui peut mettre en doute une réflexion fondée dans l'existence d'un seuil de complexité est l'existence de systèmes auto-reproducteurs bien plus simples que celui de von Neumann, qui ont été développés dans des recherches ultérieures sur les AC. Nous avons ainsi des systèmes auto-reproducteurs consistant en une description purement dynamique²⁶ – comme le loop de Langton – ou même des modèles dépourvus de description – comme ceux qui procèdent par auto-inspection, ainsi que le proposent Etxeberria et Ibáñez [1999]. En effet, même un AC doté d'une fonction de transition aussi simple que le **compteur de parité** de Fredkin (voir Figure 6) permet l'auto-reproduction.

Mais même au sein de ces modèles, un seuil ontologique de complexité – formulé, peut-être, en d'autres termes²⁷ – peut être introduit. Il est également à considérer que la vie dans son aspect cellulaire, c'est-à-dire, tel qu'on la connaît sur terre, se reproduit à la manière d'un CCU. Si l'argument du seuil de complexité pouvait être rejeté dans le cadre de l'auto-reproduction artificielle, il ne le pourrait dans celui du vivant terrestre.

²⁴ WHEELER J. A. [1974] «Beyond the End of Time» In: REES M., RUFFINI R., WHEELER J. A. *Black Holes, Gravitational Waves and Cosmology: An Introduction to Current Research*. New York: Gordon and Breach. Mentionné par DENNETT [1995], 179

²⁵ DENNETT [1995], 179

²⁶ Des modèles dépourvus d'une description à part qu'ils auraient à interpréter.

²⁷ ETXEBERRIA, IBÁÑEZ [1999], 312 proposent, par exemple, de considérer le seuil de complexité du point de vue de la **compacité** de la description d'un système. Ceci rejoint l'argument de DENNETT [1991] sur la compressibilité que nous aborderons dans la section 1.6.

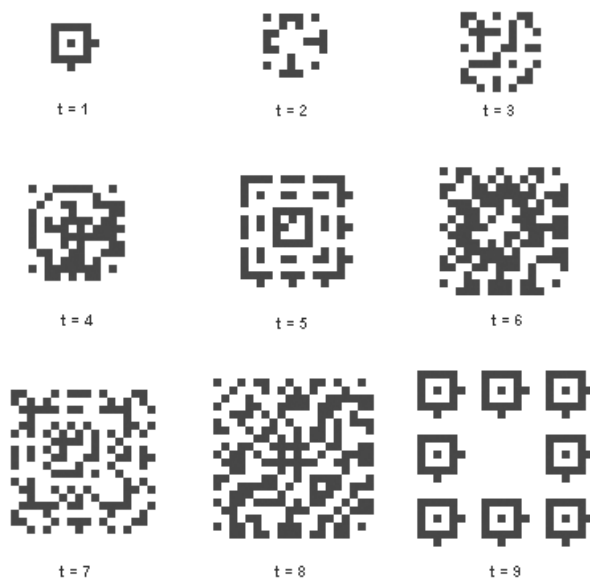


Figure 6: Le *compteur de parité* de Fredkin. Selon sa fonction de transition, une cellule est active au temps $t+1$ ssi elle a un nombre impair de voisins au temps t – cela indépendamment du fait si, oui ou non, elle est active en t . Une telle règle a pour propriété de reproduire toute forme initiale après un certain nombre d'itérations. (Source: Ourednik, 2004)

1.6. La réalité des intentions

Même si l'on n'accepte pas l'argument du seuil de complexité, il en existe un autre pour établir le statut ontologique indépendant de certaines formes qui peuvent exister au sein d'un AC. Cet argument fut développé par Dennett [1991] et concerne la réalité des états mentaux. Il peut toutefois être rapporté au vivant.

Pour défendre l'existence de ces formes, Dennett [1991] développe une position à laquelle il donne le nom de **réalisme modéré**²⁸. Cette position prend comme point d'ancrage les patterns persistants, éléments identifiables du jeu de la vie que nous avons présentés dans la partie 1.3. Dennett [1991] argumente en faveur de la réalité de l'existence de tels patterns.

Pour retracer cette argumentation, considérons d'abord un fait relevé par Etxeberria et Ibáñez [1999]. Dans la section 1.6. nous avons parlé d'auto-reproduction. Parler d'auto-reproduction nous entraîne à concevoir préalablement la réalité de quelque chose qui se reproduit. Et ce qui peut se reproduire peut, justement, être uniquement un pattern. Nous ne pouvons *parler* d'auto-reproduction en parlant d'une simple configuration, d'un arrangement arbitraire d'atomes ou de cellules indépendants – cela pour la raison suivante:

*“In strict terms of configurations, reproduction is nonsense; a self-reproducing configuration can simply be a frozen scene, or a trivially oscillating one. In terms of patterns, it is possible to define it: a pattern is self-reproducing if, when placed in a quiescent environment, it succeeds in creating a copy of itself in its vicinity.”*²⁹

²⁸ «mild realism» dans DENNETT [1991]

²⁹ ETXEBERRIA, IBÁÑEZ [1999], 304

En regard de ce fait, ce qui est important pour Dennett est que la création d'une classe ontologique d'objets – d'un « design level » ontologique – permet de *parler* d'auto-reproduction. Elle permet de faire des **descriptions fonctionnelles** d'un AC. Dennett désigne de telles descriptions comme prédictions. Penser des patterns auto-reproducteurs en tant que réels permet de faire des **prédictions** sur le comportement d'un AC *en tant que* système auto-reproducteur.

Et cette possibilité de description fonctionnelle ne concerne pas uniquement l'auto-reproduction. Parler d'« oscillateurs » permet de prévoir – avec, même, une certitude absolue – les futurs états de l'oscillateur, en tant qu'oscillateur. De même pour des glisseurs.

“There has been a distinct ontological shift []; whereas at the physical level there is no motion, and the only individuals, cells, are defined by their fixed spatial location, at this design level, we have the motion of persisting objects; it is one and the same glider that has moved southeast []”³⁰

Dennett argumente plus loin qu'il est ainsi possible de constituer des niveaux ontologiques de plus en plus élevés. Prenons l'exemple de la Machine de Turing³¹ universelle. Nous savons qu'une telle machine est capable de calculer toute fonction calculable. En conséquence, elle peut jouer aux échecs – en simulant un algorithme de jeu d'échecs tel qu'il en existe pour des ordinateurs. Dans les années 1970, Conway et ses étudiants avaient prouvé qu'une telle machine peut être réalisée au sein du Jeu de la Vie, en utilisant des glisseurs et autres formes plus complexes comme représentants et générateurs de nombres. Dennett voit dans ces passages successifs du niveau de l'ontologie fondamentale vers celui du jeu d'échecs une série de passages à des niveaux ontologiques supérieurs.

“As a first step one can shift from an ontology of gliders and eaters to an ontology of symbols and machine states, and, adopting this higher design stance toward the configuration, predict its future as a Turing machine. As a second and still more efficient step, one can shift to an ontology of chess-board positions, possible chess moves, and the ground for evaluating them; then, adopting the intentional stance toward the configuration, one can predict its future as a chess player performing intentional actions – making chess moves and trying to achieve checkmate”³²

Ainsi, un niveau ontologique des intentions vient au monde. Et nous avons bien une intention, car, lorsque nous disons que « le joueur A joue cavalier blanc sur C3 et il le fait pour vaincre le joueur B » nous le dotons d'une intention de faire ce qu'il fait.

« Et alors, tout ce que le joueur fait peut être décrit en termes d'éléments de l'ontologie de base. Que gagnons nous en introduisant des niveaux ontologiques plus élevés ? » – c'est ainsi que peut rétorquer un éliminativiste radical. Nous gagnons toutefois bel et bien quelque chose – à chaque progression dans un niveau ontologie supérieur, nous gagnons en **compactitude** de la description des phénomènes – et cela de façon inouïe.

³⁰ DENNETT [1991], 39

³¹ Une **machine de Turing** est un objet mathématique, défini essentiellement par Σ : un *ensemble de symboles*; par Γ (inclus dans Σ): un *ensemble de symboles de travail*; par $M=\{G, D, S\}$: les *mouvements d'une tête lectrice abstraite* (Gauche, Droite, Stop); par Q : un *ensemble d'états*; et par $((Q \times \Gamma) \rightarrow (\Gamma \times M \times Q))$: une *fonction de transition des états*. Σ et Γ s'inscrivent sur une bande abstraite inspectée par la tête lectrice abstraite. Une **machine de Turing universelle**, peut simuler le comportement de n'importe quelle machine de Turing, à condition d'avoir à sa disposition une description fonctionnelle de cette dernière.

³² DENNETT [1991], 41

“The scale of compression when one adopts the intentional stance toward the two-dimensional chess-playing computer galaxy is stupendous: it is the difference between figuring out in your head what white’s most likely (best) move is versus calculating the state of a few trillion pixels through a few hundred thousand generations.”³³

Et il est tout à fait plausible de considérer cette réalité comme un argument suffisant en faveur d’un réalisme modéré, tel que le conçoit Dennett. Les intentions sont réelles, c’est-à-dire, elles relèvent d’un niveau ontologique indépendant, car, sans leur présence — qui vient se superposer à une ontologie fondamentale — la **simplicité** du modèle ne vient pas à jour. La réalité des objets persistants et des intentions réalise la **compressibilité** d’un modèle, irréaliste dans le cadre d’une ontologie réduite. Ceci permet à Dennett de formuler l’affirmation suivante:

“A pattern exists in some data – is real – if there is a description of the data that is more efficient than the bit map, whether or not anyone can concoct it”³⁴

³³ DENNETT [1991], 42

³⁴ DENNETT [1991], 34

2. Epistémologie des AC

Les AC relèvent d'un modèle et d'une méthode, c'est-à-dire, d'une façon d'accéder aux phénomènes. En tant que modèle et méthode ils appellent à une interrogation épistémologique. Nous voulons brièvement, dans cette deuxième partie, montrer deux types de questionnement épistémologiques que les AC suscitent.

Nous avancerons d'une part, un problème épistémologique particulier incarné dans la "thèse de Toffoli", déjà implicitement abordée dans la section 1.1. D'autre part, nous nous interrogerons sur la double nature du modèle que sont les AC.

2.1. La thèse de Toffoli

Ce que certains appellent la thèse de Toffoli peut être formulé dans les termes suivants:

« À chaque équation de la physique correspond un comportement microscopique élémentaire que l'on peut modéliser par un automate cellulaire. »³⁵

Dans la section 1.1., nous avons vu des arguments en faveur d'une telle thèse sans nous interroger sur ses implications épistémologiques. L'une de ces implications est très bien exprimée par Reiner [2002], dans les termes suivants:

„Wenn sich die gleichen Phänomene mittels Differentialgleichungssystemen und mittels zellulärer Automaten mit gleichem Erfolg beschreiben lassen und wenn zudem zwischen der jeweiligen Differenzialgleichung und dem Grundalgorithmus der dynamischen Iteration des entsprechenden zellulären Modells keine direkte, nomologisch deutbare Korrespondenz besteht, wie kann sich dann etwa ein Kausalmechanismus der Natur in irgendeiner der beiden Darstellungsweisen in eindeutiger Weise niederschlagen?“³⁶

Les deux descriptions, cellulaires et physiques sont nomologiquement complètes. Pourtant, elles ne fonctionnent pas dans les mêmes termes. Cette observation soutient la thèse selon laquelle l'ensemble de lois énoncées au sein des sciences de la nature ne seraient que des descriptions nomologiquement cohérentes de phénomènes naturels qui ne leur sont pas directement soumis. Comme conclut Reiner:

„Die Grundalgorithmen bzw. die Differenzialgleichungen sind demnach als Produkte unserer jeweiligen naturwissenschaftlichen Abstraktionen zu sehen, die sich auf eine jeweils spezifische Informationsreduktion stützen.“³⁷

2.2. Modélisation par AC: entre instrument de recherche et phénoménologie cellulaire

Il y a essentiellement deux façons de considérer un modèle. Nous pouvons, d'une part, considérer les AC comme **modèles d'un monde qui leur est externe**. Ils

³⁵ FATÈS [2001], 30

³⁶ REINER [2002]

³⁷ REINER [2002]

servent alors à réduire la complexité de ce monde afin de pouvoir conduire des analyses logiques qui peuvent lui être rapportés. La méthode inhérente au modèle serait alors l'abstraction inductive, suivie d'une déduction dont les résultats peuvent être comparés au monde réel – intuitivement ou par des moyens statistiques.

C'est dans cette optique que, par exemple, Epstein, Axtel [1996] parlent de la mutation de la question traditionnelle de la science « *can you explain it ?* » en « *can you can grow it ?* »³⁸.

*“Artificial society modelling allows us to “grow” social structures in silico demonstrating that certain sets of microspecifications are sufficient to generate the macrophenomena of interest”*³⁹

De ce point de vue déjà, les AC constituent un shift de paradigme unique ayant des implications pour tous les domaines des sciences.

Cependant, une critique par rapport à la faible valeur empirique – particulièrement dans le domaine des sciences humaines – des AC a été formulée. Elle tient, essentiellement, en ces termes:

*“Indeed, one might say that von Neumann’s is a model of ‘life’ only in the same sense as chess is a model of ‘war’: a board game that qualitatively captures certain essential feedback loops of a certain situation.”*⁴⁰

L'analogie de la critique est correcte, ainsi que la conclusion – si les AC reflètent les phénomènes du monde humain, ils ne le font qu'en tant que métaphores. De même qu'un jeu d'échecs, les phénomènes d'un AC n'apparaissent qu'au sein d'une ontologie intrinsèque au modèle. Même si, à notre avis, l'apport des métaphores à la *compréhension*⁴¹ de phénomènes humains est, en soi, inestimable, cela peut être considéré comme faiblesse, surtout si l'on juge le modèle du point de vue de sa valeur strictement pragmatique. Du point de vue mathématique et philosophique, cependant, la teneur de "monde à part" des AC constitue leur force. Il est, à ce titre, intéressant de noter que von Neumann lui-même n'a jamais exécuté son modèle – il s'agissait d'un pur **Gedankenexperiment**. Et c'est justement en cela que réside une deuxième façon de concevoir les AC, en tant que modèles.

*“There is an important sense in which models are different in the empirical sciences and in the formal ones: the former try to represent the observational, while the latter are developments of a set of axioms. [] It is interesting to build computational models of complex systems of the second kind in which the formal consequences of a set of axioms can be explored. The appeal of this is to study the hypothetical – including contrafactual – situations, even if they are far from the observed facts of the real world, because they can open a new theory”*⁴²

Ceci appelle, en dernier lieu, à une phénoménologie des automates cellulaires eux-mêmes, c'est-à-dire, des simulations informatiques qu'ils permettent de produire. Et la question d'une phénoménologie des AC n'est pas de savoir quel est "l'ontologie réelle du monde" mais quels phénomènes peuvent être observés dans

³⁸ EPSTEIN, AXTEL [1996], 20

³⁹ *ibid.*

⁴⁰ TOFFOLI [1994], 2

⁴¹ au sens Dilttheyen du terme.

⁴² ETXEBERRIA, IBÁÑEZ [1999], 317

un monde dont l'ontologie fondamentale est telle et telle. Une phénoménologie des AC nous permet par exemple de clarifier des notions tels que l'**émergence** ou l'**individualisme méthodologique**.

La rigueur analytique d'une phénoménologie des AC réside dans le fait qu'aucun de ses éléments n'est stipulé par une spéculation métaphysique.

“There is no backstage; there are no hidden variables; the unfolding of the physics of objects in the Life world is directly and completely visible.”⁴³

La phénoménologie des AC est une science authentiquement **déductive**.

En dernier lieu, notons que, si nous voulons parler d'une phénoménologie des AC, celle-ci ne peut se réduire et ne se réduit pas à une analyse des phénomènes qui y émergent. Les AC nous forcent à nous interroger sur la *façon* dont nous comprenons ces phénomènes et les phénomènes en général. Une telle interrogation nous apporte dans tous les cas une connaissance de nous-mêmes, indispensable à une compréhension authentique du monde.

⁴³ DENNETT [1991], 38

Bibliographie

- DENNETT D.C. [1991] « Real Patterns » In: *The Journal of Philosophy*, 88(1), pp. 27-51.
- DENNETT D.C. [1995] *Darwin's Dangerous Idea*. New York: Simon & Schuster:
- Chap. 3.5.: « Who's afraid of reductionism »
- Chap. 7.3.: « The Laws of the Game of Life »
- EPSTEIN J. M., AXTELL R. L. [1996] *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*, Brookings Institution Press, Washington, D.C.
- ETXEBERRIA A., ÍBAÑEZ J. [1999] 'Semiotics of the Artificial: The 'Self' of Self-Reproducing Systems in Cellular Automata' In: *Semiotica*, 127(1-4), pp. 295-320.
- FATÈS N. [2001] *Les automates cellulaires: vers une nouvelle épistémologie?* Mémoire de DEA en Histoire et Philosophie de Sciences sous la direction de Jean Mosconi, Paris I Sorbonne
- HEDRICH Reiner [2002] « Zellulare Automaten: Diskrete Modelle der Welt ? » In: *Philosophia naturalis*. 2002; 39 (1) : 1-24
- TOFFOLI T. [1994] « Occam, Turing, von Neumann, Jaynes: How much can you get for how little? (A conceptual introduction to cellular automata) » In: *InterJournal*. Dec. 1994.
- WOLFRAM S. [2002] *A New Kind of Science*. Wolfram Media.
- ZEIGLER B. P. [1990] « Cellular space models: New formalism for simulation and science » In: SALMON M., *The Philosophy of Logical Mechanism*. Kluwer: London.