

neraient-ils seuls la météorologie de toute la planète ? Je ne doute pas de l'importance du phénomène de précession des équinoxes, mais je m'étonne qu'il consacre autant d'anthropique attention à nos *a priori* géopolitiques.

AYERDHAL, Ecully

## Réponse de Jean-Claude Duplessy

Les deux hémisphères sont très dissymétriques. L'hémisphère Sud a un continent englacé en permanence, l'Antarctique, lui-même entouré d'un océan froid. Les variations de volume des glaces sur l'Antarctique sont donc très limitées. Au contraire, l'hémisphère Nord dispose de continents aux hautes latitudes, aujourd'hui libres de glace, mais susceptibles de s'englacer facilement si la température y baisse un peu (de vastes zones du Canada sont juste au-dessus des températures moyennes annuelles négatives et peuvent garder des « neiges éternelles » si les températures s'abaissent de moins de un degré). C'est pourquoi l'hémisphère Nord est particulièrement sensible aux variations de l'insolation aux latitudes de 65°N. En plus, deux phénomènes amplifient cette sensibilité :

- le ralentissement du Gulf Stream qui remonte moins au Nord et provoque une baisse des températures de la mer de Norvège et du Groenland, ce qui contribue à amplifier le refroidissement des hautes latitudes de l'hémisphère Nord ;

- la disparition de la forêt boréale si la température de l'air diminue un peu. Cette forêt disparaît pour se transformer en toundra qui absorbe moins le rayonnement solaire et facilite le développement d'un manteau neigeux qui lui aussi réfléchit le rayonnement solaire. Tout cela amplifie le refroidissement dû à la baisse de l'insolation.

La climatologie ne connaît donc ni anthropocentrisme, ni *a priori* géopolitique, mais répond strictement aux lois de la physique.

## Les vrais ancêtres

La première pièce d'hominidé (un fragment d'humérus), découverte à Kanapoi au Kenya en 1965 par Bryan Patterson, fut publiée dans *Science* en 1967 par ce dernier et son collègue Howells. Meave Leakey et Alan Walker affirment que l'importance de cette découverte ne sera reconnue qu'une trentaine d'années plus tard (voir *Les premiers hominidés en Afrique*, *Pour la Science*, août 1997). Il n'en est rien ! Les nouvelles découvertes réalisées sur le site

de Kanapoi confirment des travaux français réalisés à la fin des années 1970. C'est notamment cette pièce réétudiée en 1977, et que j'ai attribuée à *Homo*, en 1979, qui a été à l'origine du débat sur la présence d'un type d'hominidé très humain vers quatre millions d'années en Afrique orientale. Cet homme ancien aurait coexisté avec des australopithèques : avec l'étude du matériel de Hadar, depuis 1978, de nombreux auteurs ont émis un doute sur le fait que les fossiles regroupés sous le nom d'*Australopithecus afarensis* appartenaient à une seule et même espèce. Ils montraient qu'il y avait deux hominidés mélangés dans l'espèce *afarensis*, un australopithèque et un *Homo* ancien.

Dans l'article, il est clairement précisé que les éléments postcrâniens d'*Australopithecus anamensis* sont très humains, et que ses éléments craniodentaires sont identiques à ceux des hominidés de Laetoli. Or, ces derniers, rapportés à *Australopithecus afarensis* en 1978 devaient, en fait, être attribués à *Praethropus africanus* (défini à partir d'un maxillaire trouvé à Garusi dans les gisements de Laetoli en 1938), mais lorsque l'espèce *afarensis* fut créée, ses inventeurs pensaient que ce matériel appartenait à un australopithèque. Les découvertes récentes de Kanapoi confirment que le *praeanthrope* a existé, que le matériel de Laetoli n'appartient probablement pas à un australopithèque et que la démarche bipède de type humain est très ancienne.

Les travaux de M. Leakey et A. Walker sous-tendent l'idée que les australopithèques ne sont pas nos ancêtres directs, bien qu'ils n'en fassent pas état dans leur phylogénie, fondée sur les caractères dentaires. Si on accepte cette dernière, il faut envisager qu'un mode de locomotion aussi spécialisé que le nôtre soit apparu vers quatre millions d'années, pour disparaître chez les australopithèques, puis réapparaître chez *Homo* vers 2,5 millions d'années.

D'un point de vue évolutif, ceci est discutable. En revanche, si on utilise le mode de locomotion comme base de la reconstitution phylogénique, le schéma se clarifie. Le matériel de Kanapoi confirme que la bipédie humaine serait apparue très tôt et avec elle la lignée humaine. Les caractères primitifs mis en évidence sur les mâchoires et les dents indiqueraient que ces êtres auraient eu un type d'alimentation et de mastication peu différent des premiers australopithèques, car ils avaient accès aux mêmes nourritures. Les *praeanthropes*, premiers représentants de la lignée humaine, auraient côtoyé

les australopithèques, qui ne seraient pas les ancêtres des hommes ultérieurs.

Il faut relever aussi la mauvaise présentation du scénario de l'East Side Story : la séparation entre les grands singes et les hominidés se situe, selon Yves Coppens, vers huit millions d'années (voir *Une histoire de l'origine des hominidés*, *Pour la Science*, juillet 1994). Dans l'état actuel de nos connaissances, entre huit et quatre millions d'années, plusieurs spécimens et les plus anciens hominidés sont trouvés à l'Est (et exclusivement à l'Est) du Rift au Kenya. La découverte d'*Australopithecus bahrelghazali* au Tchad, ou d'ardipithèque, ou des pièces de Kanapoi ne remet pas en cause l'hypothèse d'Y. Coppens.

Même si l'environnement s'assèche et qu'une savane s'installe, à l'échelle locale, on trouve toujours une forêt-galerie près des fleuves ou en bordure de lac. Il est certain que les faunes ont changé entre huit et quatre millions d'années et que ces dernières se sont adaptées progressivement à des environnements plus ouverts, et il semble bien que nos plus anciens parents aient réagi comme les autres animaux. Les auteurs mélangent deux échelles d'étude : un concept d'assèchement global et la présence de milieu boisé local.

Brigitte SENUT, MNHN, Paris

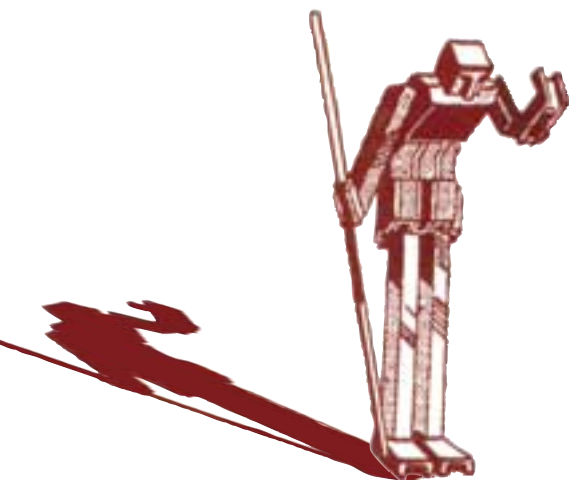
## L'énergie de SOHO

Le satellite *SOHO* (voir *SOHO révèle les secrets du Soleil*, *Pour la Science*, août 1997) contient assez de carburant pour dix ans. Les satellites fonctionnent habituellement à l'énergie solaire, alimentés par des panneaux de photovoltaïque : de quel carburant s'agit-il et à quoi sert-il ?

J. GOURIOU, Annemasse

Le satellite *SOHO* fonctionne en effet principalement à l'énergie solaire. Toutefois, il est aussi équipé d'une turbine à gaz, mue par la combustion catalytique d'hydrazine. La mise en route régulière de ce moteur d'appoint corrige les légères déviations du satellite par rapport à sa direction idéale d'observation.

Écrivez à *Pour la Science* vos réactions, vos commentaires et vos réflexions sur l'actualité scientifique. Courriel électronique : 101641.3525@compuserve.com. Retrouvez la Tribune sur l'Internet à l'adresse <http://www.pourlascience.com>



# Qu'est-ce que la vie artificielle ?

FRANCISCO VARÉLA

*L'émergence de la vie passe par la compartimentation de la cellule et par une organisation fondée sur la perception-action.*

Il y a une vie «anecdotique» qui a le mérite de frapper les esprits, les Tamagotchis, ces petits chiens électroniques que l'on nourrit, que l'on soigne ; mal traités, ils meurent, bien nourris, ils se reproduisent. Ils ne sont peut-être pas dignes d'une analyse poussée, mais montrent qu'avant d'envisager la vie artificielle, peut-être faut-il se demander ce qu'est la vie... «naturelle». Le problème de la définition de la vie se pose quand on s'interroge sur ce que pourrait être la vie extraterrestre, la naissance de la vie sur Terre, et la vie minimale. Quelles sont les fonctions qui caractérisent le vivant ?

Dans la méthode scientifique habituelle, on valide les hypothèses par l'exactitude des prévisions fondées sur celles-ci. Avec la vie, le raisonnement méthodologique est légèrement différent : on implémente les qualités hypothétiques de la vie sur un organisme artificiel et, quand il se comporte comme un organisme vivant, la définition est validée. L'artificiel permet ainsi de juger les hypothèses sur le fonctionnement de la vie. On définit par exemple ce qu'est une cellule minimale, pour fabriquer un être artificiel qui a les attributs du naturel. On étudie certaines fonctions de système neuronal, on fait des simulations et on les compare aux vrais cerveaux : la simulation confirme notre compréhension du cerveau et la justesse de notre caractérisation.

Cette procédure est d'utilisation délicate. Si l'artificiel est une imitation du naturel, il faut s'interroger : quand l'imitation devient-elle preuve ? Si je construis quelque chose qui n'est pas une imitation, mais qui est qualitativement comparable, voire équivalente, ce n'est plus tout à fait une imitation. Selon notre point de vue, c'est tout de même un moyen pour caractériser le vivant. Le vivant est défini par ses qualités plus que par son mode d'implémentation.

Le volet de l'artificiel, qui appartient à l'ingénieur de la robotique, au biotech-

nologue ou aux gens qui s'intéressent à des applications, est une discipline en soi. Il importe aujourd'hui de séparer le côté technologique et appliqué de l'artificiel, et la base scientifique fondamentale. Nous nous intéresserons ici aux caractéristiques

biologiques de la vie dans ses liens avec les dimensions de l'artificiel relevant de la recherche de base.

## LA COMPARTIMENTATION

La question de la vie minimale rejoint celles sur l'origine de la vie et la vie extraterrestre. Elle impose la détermination d'un critère. Quelles étaient les caractéristiques des premiers organismes vivants ? Quelles questions allons-nous poser à un extraterrestre lointain pour déterminer s'il est un être vivant ?

Deux camps s'affrontent aujourd'hui : ceux qui pensent que l'existence de l'ARN, c'est-à-dire les acides nucléiques, est une condition nécessaire et suffisante, et ceux qui estiment que cette existence n'est que nécessaire et qu'il faut quelque chose de plus. Les ARN sont des molécules qui ont une double fonction : elles sont des briques utilisées pour la construction de structures complexes et ont aussi une capacité catalytique, fonctionnant comme des enzymes. Cette double capacité, que n'a pas l'ADN, a convaincu certains que l'ARN caractérisait le vivant minimal.

Sans ARN, pas de vie. C'est certain. Mais s'il y a l'ARN, y a-t-il la vie ? Ma réponse est : pas nécessairement. Il faut qu'il y ait une frontière qui sépare une entité du reste de la soupe moléculaire où elle se trouve.

Tous les biologistes sont convaincus que la vie n'est pas séparable de la notion de cellule, mais les tenants de l'ARN pensent que la cellule n'est qu'une conséquence des possibilités enzymatiques de l'ARN. Le camp dont je fais partie juge indispensable la constitution d'une membrane frontière, d'un compartiment qui dégage l'ARN des réactions biochimiques externes, et qui n'est pas inscrite dans l'ARN.

Cette séparation biologique doit être engendrée par l'élément constitutif de la vie minimale. D'où la notion que j'ai élaborée il y a quelques années : l'au-



Premiers dessins de cellules par le physiologiste Theodor Schwann (1839).

topoïèse, c'est-à-dire l'autoproduction. La vie est révélée si et seulement si la cellule, au sens étymologique du terme, produit des briques pour construire la frontière qui l'enceint. J'énonçais cette idée il y a une vingtaine d'années pour des raisons qu'on pourrait discuter, mais elle a depuis été reprise par nombre de biologistes.

Pour la remarquable biologiste Lynn Margulis, une telle compartimentation autoproduite est le critère déterminant l'origine de la vie, le moment où les macromolécules complexes s'enchaînent pour constituer les bords du compartiment interne. Sur Mars, si nous voulons prouver l'existence de la vie, il faudra trouver des «cellules» autoproduites soit par ARN, soit par d'autres molécules.

On pourrait penser que les biologistes manquent d'imagination dans la mesure où ils ne peuvent imaginer une vie sans ARN. L'équipe de L. Luisi, à l'Institut polytechnique de Zurich, a essayé de constituer des cellules avec seulement des lipides bipolaires et a partiellement réussi au prix d'une ingéniosité expérimentale absolument admirable. Aussi la question reste ouverte : il y a peut-être deux ou trois autres possibilités autres que l'ARN, mais le choix est certes limité.

### ROBOT EXPERT OU ROBOT BÉBÉ?

La robotique est un autre versant de la question. Tout le monde a vu 2001, l'odyssée de l'espace où HAL, une énorme machine, incarne la notion du robot des années 1960-1970, un appareil cognitif extrêmement logique, performant, avec une mémoire formidable, des capacités déductives, etc. Qu'est-ce qui manque à HAL? Le corps! HAL n'est pas incarné dans une souplesse de perception et action qui lui donne une autonomie par rapport à son monde.

Ce qui manque aux robots n'est pas la mémoire ou la logique, c'est la simple capacité de voir, de faire des mouvements en fonction de la perception de l'environnement. L'expert d'échecs n'est pas le héros à imiter, l'expert, c'est le bébé. Les bébés dépourvus de connaissance abstraite se débrouillent très bien dans leur environnement. La partie la plus longue de l'évolution a été l'établissement de la capacité d'exister comme une entité autonome, qui bouge et qui perçoit. Les arthropodes, nos plus vieux compères dans l'histoire de la planète, ne sont essentiellement pas autre chose. Que manque-t-il à HAL? La faculté de bouger pour se débrouiller avec l'inattendu du monde. La simulation n'est ainsi pas un bon test du naturel, car c'est un monde construit sans inattendu.

L'inattendu est que la vie est associée à un monde physique et chimique où la variabilité est littéralement infinie. Il n'est pas épuisable, et certaines lois se dégagent, mais il y a une richesse qui empêche la simulation et qui milite en faveur de la construction.

Pourquoi ce que je vois dans mon ordinateur n'est-il pas du vivant? Parce que cet objet n'est pas autonome, n'a pas d'existence séparée de cet univers informatique figé. Dans les années 1950-1960, on pensait que l'on pouvait, en simulant, explorer toutes les possibilités. Impasse. Le monde est trop riche pour que le vivant possède une représentation préalable complète ou même utile.

### LA REPRODUCTION EST UNE CONSÉQUENCE

Je n'ai pas inclus la reproduction dans ma définition de la vie, car je crois que ce serait une erreur épistémologique. Les traces paléontologiques de l'histoire de la vie remontent à 3,8 milliards d'années, âge des bactéries fossiles que l'on a trouvées dans certains sédiments. Là les premières traces repérables de vie sont des archéobactéries qui ressemblent beaucoup à certaines bactéries actuelles. Or la reproduction d'une archéobactérie n'est pas celle des mammifères. Chez les protozoaires, la reproduction c'est tout simplement une fission. Vous soumettez un système autonome autopoiétique à une turbulence avec des lames de fluide relativement puissantes, ce qui est le cas dans tous les systèmes aquatiques terrestres, et vous avez très facilement des fissions.

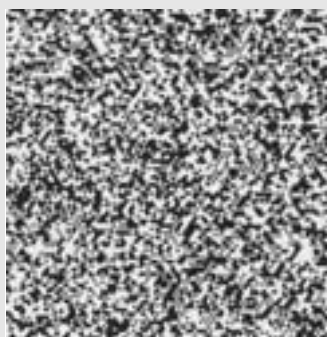
Le fait inattendu est que la reproduction est une conséquence banale de l'existence individuelle. Le difficile est de créer un individu qui s'autoproduit avec sa frontière. Le coupez en deux c'est facile.

Bien entendu, dès qu'existe un minimum de capacité de fission et de division, la logique évolutive intervient : des variations introduisent une certaine diversité et des pressions sélectives qui déclenchent la sélection darwinienne. En quelques millions d'années, les cellules ont acquis certaines molécules qui facilitent la fission ou qui favorisent des fissions sélectives avec d'autres organismes. La reproduction est nécessaire à l'évolution, pas à l'origine de la vie.

### LA CONSTITUTION DE L'IDENTITÉ

Faut-il parler de la vie comme si c'était une seule chose? La vie minimale cellulaire, c'est-à-dire la détection d'un seuil de passage du vivant au non-vivant, est un aspect essentiel de la vie, ce n'est pas le seul. Il y a d'autres niveaux de vie organique plus graduels où se manifestent à divers stades les capacités d'adaptation, d'évolution, voire d'acquisition des connaissances.

Dans les organismes multicellulaires, les unités cellulaires sont imbriquées à des niveaux de complexité presque invraisemblables. L'ensemble des cellules d'un organisme n'est pas une collection arbitraire, il est organisé par des communications moléculaires – hormones et surtout médiateurs immunitaires. Une identité macromoléculaire se constitue pour donner un corps. Une frontière sépare le soi du non-soi, elle entraîne par exemple le rejet des greffons et les réactions de fièvre lors d'une infection. Cette identité somatique diffère de l'identité cognitive qui est orchestrée par le système nerveux fondé sur l'organisation de base de perception-action, c'est-à-dire la boucle organes sensoriels et muscle à travers le cerveau, mais aussi la mémoire, l'apprentissage.



L'émergence d'une image cérébrale à partir de stéréogrammes illustre l'apparition d'une image globale à partir des informations stockées dans le cerveau. Ici vous voyez apparaître, après quelques secondes, un triangle flottant sur le fond (l'image est placée à environ dix centimètres des yeux).

Si vous avez le malheur d'avoir un accident cérébral, l'identité cognitive peut être atteinte sans que votre identité somatique le soit. Ou vice versa. Nous connaissons tous des individus qui ont une activité interne intense, mentale et spirituelle, dans un corps réduit à rien. Ce sont deux modes d'identité distincts qui constituent un organisme. Les deux entités sont si bien séparées que je préfère le découpage en organismes plutôt qu'en organes, intermédiaire du vivant trop considéré dans le passé.

Dans le cas des mammifères, coexistent les systèmes somatiques et cognitifs ; pour les plantes, il y a le système somatique et d'autres modes identitaires, mais qui ne sont pas cognitifs, parce que les plantes ne bougent pas. Le cerveau est essentiellement lié à la mobilité, dès que vous bougez, vous développez un cerveau.

### LE JOUEUR D'ÉCHECS N'EST RIEN

La surprise a été de trouver que le secret de la capacité cognitive et adaptative n'est pas dans les logiques, n'est pas dans l'abstrait, n'est pas dans la simple manipulation : c'est la capacité de se débrouiller dans le monde, de chercher, de s'orienter, d'éviter. La connaissance n'est pas un ensemble de processus mentaux abstraits, dont les joueurs d'échecs seraient le plus pur accomplissement.

Le joueur d'échecs me paraît, au contraire, élémentaire. Les règles sont fixes dans un monde qui ne bouge pas, et à l'intérieur de ces règles, il suffit de calculer. Or la vie n'est pas ainsi réglée. On s'en est rendu compte dans les années 1960 : à l'Institut de technologie du Massachusetts, un grand programme devait être inséré dans une machine censée résoudre tout problème qu'on pouvait se poser. L'inattendu est que les questions à résoudre ne sont pas énumérables par une liste finie. On ne peut écrire des modules de raisonnement et d'action pour les différentes fonctions du corps.

En 1989, un chercheur du même institut, Rodney Brooks, a écrit un article qui s'appelait *L'intelligence sans représentation*. Il prônait de construire une bestiole qui n'avait aucun savoir sur ce qu'est le monde, mais qui savait se débrouiller au coup par coup. Ce petit insecte pouvait pourtant ne rien connaître des règles de la physique ni des règles d'inférence, il était dépourvu de système schématique ou symbolique, et pourtant il pouvait être efficace parce que construit sur la base des boucles perception-action. Initialement il n'avait même pas de faculté d'apprentissage. On songe, bien évidemment au petit robot-insecte envoyé sur la surface de Mars.

La bataille actuelle oppose les cognitivistes qui travaillent toujours sur un paradigme de représentation de traitement de l'information et les situationnistes qui pensent que la connaissance est une adaptation concrète, au coup par coup et par situation. Pour eux, le héros n'est pas le joueur d'échecs, mais l'insecte ou le bébé.

Le mathématicien Turing avait concocté une définition de l'intelligence pour un mathématicien : la machine était intelligente lorsqu'on ne pouvait distinguer ses réponses verbales de celles d'un être humain. Selon ce critère l'ordinateur *Deeper Blue* est intelligent. Cette définition est peu satisfaisante pour le biologiste : l'intelligence n'est pas un ensemble de règles, mais la débrouillardise dans un environnement changeant.

Les objets vivants ont un système perceptif qui commande un système de mouvement, lequel affecte la perception ; l'animal a potentiellement la capacité sensori-motrice de se débrouiller, et les solutions de débrouillardise sont étonnamment variées. Regardez le monde animal où 1 000 solutions différentes remplissent la même fonction. Le langage, l'imaginaire, sont des prolongements ultérieurs, des solutions de débrouillardise.

La grande invention de la vie animale est la boucle capteur-neurone-muscle. À partir de là, il y a une complexité croissante de l'auto-organisation cérébrale. Des interactions suffisamment complexes, c'est-à-dire non linéaires, font émerger un état global du cerveau qui sont à la base des performances «supérieures» : l'imagination, la communication. La recherche tente de définir les règles d'émergence de la représentation globale. Comment les activités locales de tous les neurones s'organisent en un tout compréhensible ? C'est la première fois dans l'histoire de la neurologie que les biologistes flairent des pistes pour comprendre comment cet énorme système peut fonctionner de façon harmonieuse et en même temps avoir la capacité de fluidité pour passer d'une chose à l'autre avec souplesse et beauté.

**Francisco VARÉLA est directeur de recherche au CNRS, au Laboratoire des Neurosciences Cognitives (LENA) à l'Hôpital de la Salpêtrière.**

**F. Varéla, *Invitation aux Sciences Cognitives*, Seuil, Points Sciences, 1996.**

**F. Varéla, *L'arbre de la connaissance*, Addison-Wesley France, Paris, 1994.**

**Ce texte est une transcription par la revue du débat enregistré, avec Émile Noël, au Palais de la Découverte. Ce débat sera diffusé sur France Culture, le 8 octobre 1997, à 9h05.**