

Texte de la 262^e conférence de l'Université de tous les savoirs donnée le 18 septembre 2000.

LA VIE ARTIFICIELLE

Par Hugues BERSINI

Surprendrais-je un biologiste en lui annonçant que l'utilisation de l'ordinateur devrait-lui permettre d'accomplir de grands progrès dans sa discipline ? J'en doute. Cette utilisation est courante dans toutes les disciplines scientifiques actuelles et toutes ont été extraordinairement marquées, à différents degrés, par son emploi. De toutes les machines contemporaines, l'ordinateur est la seule à avoir ce formidable don d'ubiquité et de travestissement. En le programmant de mille façons diverses, vous pouvez faire de l'ordinateur de multiples classeurs, un système de stockage d'information, une télévision jointe à une sono, un support multimédia, un fax ou un téléphone, un mode de communication, etc... Ce don revient, pour une large part, à la « virtualisation potentielle » de l'information qui nous entoure, et qui permet à cette information de rester inaltérée quel que soit son support. Images, sons, films, écrits, musique, tout n'est finalement qu'un océan de « bits » qui ne demandent, pour être stockés et transmis, qu'un support électronique, optique ou magnétique pouvant capturer et véhiculer ces bits. Jusqu'où nous emportera cette vague de « virtualisation », à l'heure où les enfants jouent avec des « tamagoshi » plus vrais que nature, où Kasparov abandonne face à un cube froid capable de milliards d'anticipations, où l'on peut choisir sa cuisine en les essayant toutes, et où les pilotes expérimentent au sol des situations catastrophiques qu'ils n'espèrent jamais retrouver là-haut ? La réponse pour certains est immédiate, tout n'est que « virtuellement virtuel », et nul ne s'étonnera d'apprendre que des chercheurs informaticiens consacrent leur temps à fabriquer de l'« intelligence artificielle », de la « réalité artificielle » et, pour nous ici, de la « vie artificielle ». Par « vie artificielle », on entend l'utilisation massive de l'ordinateur pour reproduire dans un substrat autre que biochimique des mécanismes communs aux organismes vivants. Dans la vie artificielle, on s'emploie à sous-estimer le substrat au profit de la fonction. La vie apparaît à l'intersection d'un ensemble de processus qu'il est important d'isoler, de différencier et de dupliquer dans l'ordinateur. Dès l'instant où les processus se suffisent à eux-mêmes, conséquence naturelle mais osée, l'ordinateur qui les reproduit se retrouve consacré vivant parmi les vivants.

RIEN DE NOUVEAU SOUS LE SOLEIL ?

La biologie partage depuis toujours ce même souci de compréhension des organismes vivants ; de modélisation sans doute un peu moins. Le biologiste n'a pas vocation d'apprenti sorcier, il reste en grande partie les yeux rivés sur la Nature, la disséquant, la détaillant, tentant d'en comprendre et d'en prédire le fonctionnement. Or dans la vie artificielle, l'ordinateur s'empare du premier rôle, c'est la biologie qui vient à lui plutôt que l'inverse. Il s'agit de faire fonctionner l'ordinateur de manière biologique, d'intégrer algorithmiquement les leçons du vivant et de les tester par le biais de ce cobaye informatique. Parmi ces leçons, trois sont à l'origine de la plupart des travaux repris dans cette nouvelle discipline : « émergence fonctionnelle », « adaptabilité » et « autonomisation environnementale ». L'informaticien se donne pour nouvelle mission de

réaliser des plates-formes logicielles expérimentales où ces trois mécanismes, isolés ou réunis, sont testés, simulés et, plus systématiquement, analysés. Le projet aura d'autant plus de vigueur que ces mécanismes se retrouvent à l'œuvre, à un niveau d'abstraction donné, dans une multitude de systèmes biologiques : génétiques, neuronaux, hormonaux, immunitaires, cellulaires, société animale, etc... Une meilleure expérimentation et compréhension de chacun d'eux pourra avoir un large impact, se propageant sur toutes les disciplines biologiques d'où ces mécanismes sont abstraits.

Le biologiste reste évidemment l'interlocuteur privilégié, mais que peut-il espérer de la part de cette « vie artificielle », de ces nouveaux *merlins hackers* aux ambitions, apparemment naïves ? Ces plates-formes informatiques peuvent avoir plusieurs utilités, présentées dans la suite par importance croissante. Elles peuvent d'abord déboucher sur une nouvelle didactique des grandes idées biologiques : il en va ainsi de Richard Dawkins, qui porte la bonne nouvelle darwinienne¹ à l'aide d'une simulation informatique où des créatures appelées « biomorphes » évoluent par algorithmes génétiques sur l'écran de son ordinateur. Elles peuvent ensuite, pour peu qu'elles soient suffisamment malléables, paramétrables et universelles, se prêter à une exploitation précise du biologiste, qui trouvera là, un moyen simplifié de réaliser la simulation d'un système biologique étudié. Elles s'apparenteraient alors à d'autres environnements de développement informatique, très prisés chez les ingénieurs ou autres scientifiques qui les utilisent pour faciliter leur travaux d'expérimentation ou de modélisation ; je pense à un *matlab* ou *mathematica* pour biologistes. Automates cellulaires, réseaux booléens, algorithmes génétiques, chimie algorithmique, sont d'excellents logiciels à insérer dans cet environnement informatique. Finalement, ces plates-formes peuvent mener, à force d'expérimentations systématiques, à la découverte de nouvelles lois naturelles, dont l'impact sera d'autant plus important que les systèmes biologiques concernés par les abstractions simulées sont nombreux. Ainsi, lorsque certains² découvrent que le nombre d'attracteurs dans un réseau booléen ou un réseau de Hopfield dépend linéairement du nombre d'unités dans ces réseaux, ces résultats pourraient tout autant concerner le nombre de cellules exprimés par un réseau génétique que le nombre d'information mémorisable dans un réseau de neurones. Je pense alors à un langage algorithmique nouveau, aussi propice à la biologie que ne le sont les mathématiques à la physique ; un langage qui s'habillerait très naturellement des réalités biologiques qu'il permet de mieux appréhender, mais dont le fonctionnement, mis à nu, est déjà porteur d'un ensemble d'inférences et de prédictions à portée universelle.

L'ingénieur est un autre interlocuteur naturel. La nature a toujours constitué une réserve d'inspirations pour la réalisation d'artefacts utiles à l'homme. Il suffit de voir comment Léonard de Vinci passait avec bonheur de ses croquis d'anatomie à ceux d'ingénierie. La vie artificielle a conduit à de nouveaux outils informatiques, à l'instar des algorithmes génétiques, des réseaux booléens, des automates cellulaires et bien d'autres, par lesquels se dessine une nouvelle vision de l'informatique pour l'ingénieur : parallèle, adaptable et autonome. Dans cette informatique, les problèmes complexes sont affrontés à l'aide de mécanismes simples, mais itérés infiniment dans le temps et l'espace. Dans cette informatique, paradoxe suprême, l'ingénieur doit se résigner à partiellement perdre le contrôle pour aboutir à la chose utile.

Je développerai les trois leçons du vivant déjà esquissées, portant indifféremment la casquette du biologiste ou celle de l'ingénieur.

¹ Dawkins (R.) *The blind watchmaker* W.W. Norton & Company éditions, 1986

² Kaufmann (S.) *At home in the Universe*, Oxford Univ Press (Trade), 1996 ; ISBN : 0195111303

LES TROIS LEÇONS DU VIVANT

ÉMERGENCE FONCTIONNELLE

C'est à la fois la leçon la plus importante et la plus incomprise. Un système complexe se caractérise habituellement par son fonctionnement à plusieurs niveaux d'abstraction. Chaque niveau se suffit à lui-même, possède ses propres mécanismes de contrôle et ses règles de comportement, étant entendu que ce fonctionnement ne dépend *in fine* que du niveau juste en dessous. Lorsque mon enfant, jouant à « FIFA 2000 » sur son PC, sélectionne les joueurs de l'équipe tricolore, il ne se doute pas que la sélection du joueur se fera par un imbroglio électronique complexe où du courant traversera une suite effarante de portes électroniques. Pourtant le fonctionnement de chacune de ces portes prise individuellement est d'une simplicité enfantine. Ainsi, la sélection de Zidane, d'une certaine manière, « émerge » de ce trafic électronique intense. Il est vrai que les règles du foot existent et se pratiquent indépendamment des niveaux sous-jacents. Il est vrai également qu'un comportement, suffisamment intéressant que pour captiver un enfant pendant des journées entières, a pour ultime réalisation une interaction entre des portes électroniques d'un intérêt autrement plus limité.

Cependant, rien n'émerge là-dedans, dans la mesure où, de ce niveau le plus supérieur au niveau électronique le plus inférieur, tout est parfaitement sous contrôle ingénieur. Le passage d'un niveau à son niveau juste précédent est programmé, planifié, et prédictible. Un nombre réduit d'informaticiens travaille au câblage de cette circuiterie électronique. D'autres, parmi les meilleurs, interagissent avec un premier niveau d'abstraction, constitué par les instructions élémentaires du processeur. La plupart travaillent au niveau supérieur, en programmant l'ordinateur à l'aide de langages de programmation, programmes qu'un système de traduction automatisé réécrira pour le niveau juste inférieur. De plus en plus travaillent à un niveau d'abstraction fonctionnel, encore supérieur, comme lorsqu'on commande ou paramètre le fonctionnement d'applications telles que Word ou Excel. Ce principe d'abstraction fonctionnelle est la clef du fonctionnement informatique, ce qui en fait sa richesse et qui permet l'extraordinaire don d'ubiquité évoqué en introduction.

L'informatique et les systèmes biologiques ont ces différents niveaux d'abstraction fonctionnelle en commun. Tous deux peuvent présenter des fonctionnalités nouvelles, parfois complexes, à un niveau supérieur, alors que la réalisation au niveau juste inférieur se fait par interactions et itérations multiples de processus plus simples. Quand peut-on, dès lors, parler d'émergence fonctionnelle ? On réservera cette expression à la découverte par le chercheur d'un système original mis au point par la biologie pour imiter l'ordinateur, c'est-à-dire pour faire apparaître des fonctionnalités nouvelles à un niveau supérieur, et ceci à l'aide de mécanismes sous-jacents, habituellement plus simples, qui, au niveau inférieur, semblent n'avoir aucune implication directe sur ce niveau supérieur. À la différence d'une dépendance entre niveaux, parfaitement maîtrisée, de manière descendante par l'ingénieur, il y a dans l'émergence fonctionnelle, un travail quasi-archéologique, mais cette fois ascendant, où l'on s'interroge sur des mécanismes originaux à défricher et déchiffrer, inventés par la nature, pour que du « simple », connu à un premier niveau de fonctionnement, donne naissance à du « nouveau », souvent plus complexe.

Dans la figure qui suit, une colonie de fourmis, devant choisir entre deux chemins pour atteindre la nourriture, finira toujours par choisir le plus court. Il n'existe aucune fourmi guide, et aucune

n'a la capacité d'établir lequel des deux chemins est le plus court. La sélection de ce chemin est une propriété émergente de l'exécution répétée dans le temps et par chacune des multiples fourmis de deux règles élémentaires. Chaque fourmi laisse sur son chemin et à vitesse constante une trace odorante. Quand une fourmi doit choisir entre deux chemins, la tendance sera de privilégier celui des deux qui « sent le plus ».

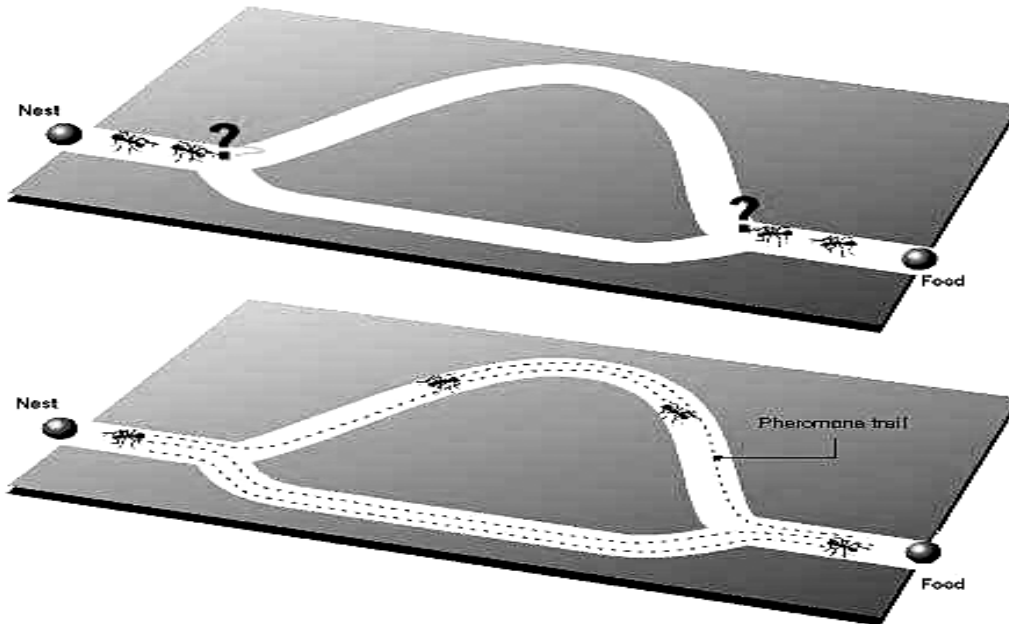
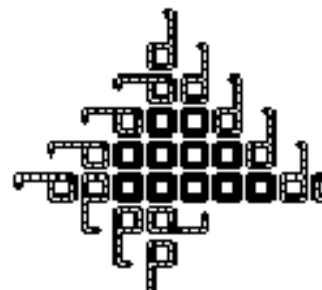
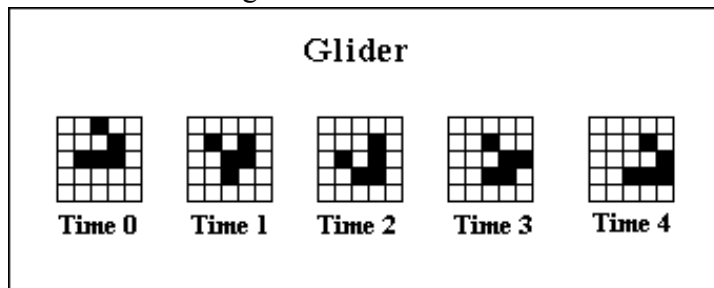


Fig.1 : Comment une colonie de fourmis trouve le chemin le plus court pour relier le nid à la nourriture.

Un de mes collaborateurs à l'IRIDIA, Marco Dorigo, s'est inspiré de ce phénomène émergent pour réaliser un des algorithmes les plus performant de « routage Internet », où les paquets Internet, comme les fourmis, décident à chaque nœud du réseau quelle direction suivre, en se basant sur l'intensité de la trace laissée par les paquets qui ont circulé jusqu'ici. Cet algorithme a de plus l'immense avantage d'être totalement adaptatif, ce qui n'est pas négligeable dans un réseau dont la charge est essentiellement non-stationnaire.



automate cellulaire auto-reproductif

Fig.2 : Le « glider » du jeu de la vie se déplace par la simple itération des trois règles. La figure dans l'automate auto-reproductif se réplique à l'infini par la simple exécution de quelques règles également.

Les automates cellulaires sont des plates-formes informatiques idéales, pour expérimenter et visualiser les phénomènes d'émergence. Dans un automate cellulaire, chacune des cellules change d'état comme une simple fonction (en général quelques règles suffisent) de l'état des cellules voisines. C'est le comportement collectif de toutes ces cellules dans le temps qui permettra, comme dans la figure 2, à une petite créature nommée « glider » de simplement se déplacer, à cet espèce de figure, proche d'un « a », de s'auto-reproduire. Le déplacement du « glider » tout comme l'auto-reproduction du « a » émerge de la simple exécution des règles de l'automate cellulaire. Nul déplacement ni auto-reproduction n'est codé ou ne transparaît dans les règles élémentaires du fonctionnement de l'automate. Pour le jeu de la vie, le comportement de l'automate est à ce point complexe, nonobstant les trois règles qui suffisent à le faire fonctionner, que des centaines de pages ne suffisent pas à décrire l'immense variété des petits phénomènes se déroulant devant nos yeux.

Les physiciens et biologistes sont déjà fort friands de ces automates cellulaires, qui leur permettent aisément de modéliser des situations où des agents simples, distribués spatialement, entrent en interaction.

ADAPTABILITÉ

Face à cette immense variété de comportements émergents, comment un système biologique, quel qu'il soit, fait-il pour sélectionner celui ou ceux qui lui servent de manière bénéfique ? Comment devient-il adaptable ? Il agit par des mécanismes de sélection ou de renforcement, qui lui permettent d'isoler, parmi cette multitude, un comportement profitable. Lors de l'exploitation ingénieriste de ces processus d'adaptabilité, c'est l'ingénieur qui se substitue à la nature pour sélectionner un comportement permettant de solutionner un problème donné. Dans les algorithmes génétiques, un problème est posé. À chaque itération, une population de candidat solution est proposée. Chaque candidat est évalué en lui associant une « valeur d'adaptabilité », qui correspond à la qualité de la solution proposée. Suivent alors trois mécanismes de type génétique : la sélection, la mutation et la recombinaison. Lors de la sélection, on ne retient dans la population suivante qu'un sous-ensemble des meilleurs candidats obtenus dans la population précédente. Les manipulations à venir se font sur ce sous-ensemble. Lors de la mutation, on altère délibérément, mais de manière aléatoire certains de ces candidats. L'espoir étant qu'une recherche erratique autour des bons candidats permette d'en découvrir de meilleurs ou au contraire que le candidat s'étant perdu dans un cul-de-sac, cette secousse bienvenue pourrait l'en délivrer. Lors de la recombinaison, deux candidats se combinent, afin d'en créer deux nouveaux, obtenus à partir d'une sous-partie de l'un et d'une sous-partie de l'autre. L'espoir étant que le nouveau candidat, l'enfant, pourrait ainsi hériter de ce qui fait la qualité de ses deux parents, qualités jointes afin de déboucher sur une solution encore meilleure.

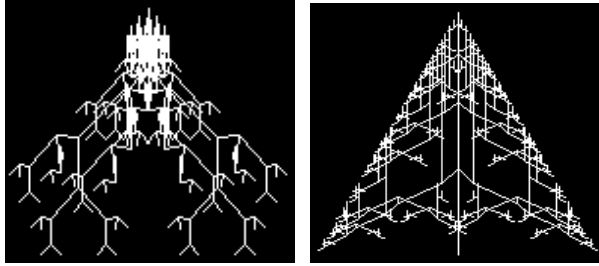


Fig.3 : Deux biomorphes de Dawkins

Ce sont ces mêmes algorithmes génétiques que Dawkins exploite dans sa croisade darwinienne, lorsqu'il fait évoluer ses biomorphes (fig.3) et qu'on retrouve dans de nombreuses simulations d'écosystèmes, où ils sont à l'origine de la naissance de nouvelles espèces, cherchant à améliorer leur valeur adaptative. Pour l'ingénieur, ces mécanismes élémentaires, reproduits un nombre incommensurable de fois, apportent d'excellentes solutions à des problèmes qualifiés d'insolubles (par exemple, les problèmes NP complets comme le « fameux voyageur de commerce »), et qui parsèment le monde de l'entreprise : ordonnancement, planification, horaire, regroupement et gestion de stocks,.... C'est par sa « force brute » et cette petite touche de biologie que l'ordinateur, tout en fonctionnant de manière élémentaire, attaque des applications fort complexes. C'est aussi à travers eux que l'ingénieur accepte cette perte de contrôle évoquée en introduction : il se « borne » à guider, orienter le processus de recherche, mais s'exclut de la production des solutions. Il n'a pas les moyens mentaux d'accompagner l'ordinateur dans sa production effrénée de possibles solutions et se contente d'avaliser les bonnes propositions, de séparer le bon grain de l'ivraie.

Si les algorithmes génétiques sont un mécanisme d'adaptabilité biologique se déroulant sur de multiples générations, l'apprentissage par renforcement, lui, se déroule sur une échelle de temps bien plus réduite, puisqu'il s'agit d'un apprentissage de type neuronal, ayant lieu pour le vivant du système biologique. Ici, on renforce positivement des paramètres, liaison ou agent (il s'agit bien souvent des synapses liant deux neurones entre eux), ayant contribué positivement à l'obtention d'une bonne solution et l'on inhibe, au contraire, les paramètres ayant contribué positivement à l'obtention d'une mauvaise solution. De nombreux robots ajustent leur fonctionnement de cette manière pour découvrir, parmi les multiples combinaisons paramétriques possibles (par exemple lorsque ceux-ci possèdent de nombreuses articulations à calibrer), celle qui les conduira à bon port.

AUTONOMIE ENVIRONNEMENTALE

Parallélisme, émergence fonctionnelle et adaptabilité sont les conditions nécessaires pour permettre à ces nouveaux artefacts d'inspiration biologique de se confronter à leur environnement, de se « mettre au monde ». Nous entrons de plain-pied dans la branche robotique de la vie artificielle dont les mascottes les plus populaires sont présentées à la figure 4. C'est aussi ici que nous trouvons les meneurs d'une des campagnes critiques les plus féroces dirigées contre l'intelligence artificielle³, qui voient la vie artificielle comme l'émanation d'une sécession irréversible. Ils reprochent à l'intelligence artificielle de négliger l'incarnation ou la mise au monde de leurs systèmes prétendument experts ou intelligents, en les faisant raisonner, toujours, à partir d'un arrière-fond symbolique ou représentationnel, fourni par l'utilisateur. Or un robot en situation doit se construire sa propre symbolisation du monde, et ceci de manière opérationnelle et autonome, c'est-à-dire une représentation utile qui lui permette de se mouvoir dans ce monde, d'y rester viable. Imaginons un système expert capable de diagnostic médical, fleuron de l'intelligence artificielle, dans son lieu naturel, le cabinet du médecin. Le patient arrive. Sans que le médecin ait mis l'expert informatique en situation, lui ait « installé » l'arrière-plan symbolique à partir duquel le raisonnement s'opérera, par exemple la description du patient et de ses symptômes, l'expert s'y trouvera complètement inefficace.

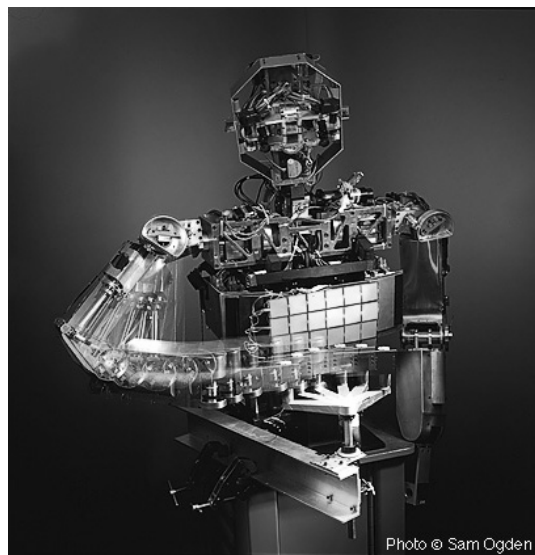


Fig.4 Quelques créatures robotiques du monde de la vie artificielle

Certains véhicules peuvent aujourd'hui rouler sans chauffeur sur une autoroute américaine. Là encore, il est parfaitement envisageable de prédire toutes les situations possibles et de fournir cette pré-symbolisation à l'automatisme. Mais qu'advient-il de ce même conducteur informatique s'il croise un cadavre sur sa route ou, pire encore, si nous lui demandons de quitter l'autoroute pour rentrer dans Paris ? La difficulté devient pour lui la prise en considération de manière automatisée de toutes les situations, des plus classiques au plus inhabituelles, qu'il pourrait rencontrer. Pour les partisans de cette nouvelle robotique, d'inspiration biologique, la réponse est

³ Brooks (R.) *Cambrian Intelligence*, MIT Press, 1999

dans la mise en situation des robots, en leur conférant de multiples primitives sensori-motrices, un support représentationnel quasi-vierge qu'il faudra alimenter, des besoins primaires (par exemple maintenir leur charge énergétique), et d'importantes facultés d'apprentissage. Muni de ce kit de base, c'est en situation que le robot s'enrichira des représentations de son monde, adéquates pour lui permettre de trouver les réponses nécessaires au maintien de sa viabilité. La critique est féroce et reprend celle adressée par de nombreux philosophes à l'intelligence artificielle. Ce n'est pas parce qu'un système informatique peut manipuler (traduire, résumer, ...) de manière syntaxique des scénari stéréotypés de restaurant, qu'il comprend un restaurant comme un être humain le comprend. Pour ces philosophes, la syntaxe ne suffit pas à la sémantique. Seul un robot, un jour de baisse de régime, se baladant en ville, avec quelques sous en poche, et découvrant ravi l'enseigne lumineuse d'un Mac Donald pour androïde, comprend vraiment ce qu'il en est d'un « restaurant ».

L'interfaçage au monde, requis par ces robots, nécessite un mécanisme parallèle de réception d'information, car soumis constamment aux stimuli de l'environnement. Ils doivent construire leurs propres concepts, nourris et stimulés par cet environnement, pour en retour leur permettre de maîtriser celui-ci. Les concepts naissent à partir des interactions sensori-motrices et servent de support à celles-ci. De même, la motricité de ces robots est également multifactorielle, émergente, et nécessite une régulation adaptative.

L'on conçoit alors, que sur la route vers de vraies créatures artificielles autonomes, les trois leçons du vivant, à peine ébauchées, se conditionnent et s'influencent mutuellement. Pour percevoir et se mouvoir dans son monde, le robot sera sujet à de multiples fonctionnalités émergentes et adaptatives.

CONCLUSION : DE LA VIE HORS DES VIVANTS

Mes conclusions s'adressent aux trois interlocuteurs déjà rencontrés dans l'article : le biologiste, l'ingénieur et le philosophe. Au premier, la vie artificielle a pour finalité de faire ressortir ce que l'ordinateur et la biologie partagent de manière intime : un fonctionnement élémentaire au niveau ultime, mais qui, par la force brute du parallélisme et des itérations sans cesse répétées, peut faire émerger des processus originaux aux niveaux supérieurs. Ces processus généreront une multitude de possible « manière d'être » qu'une phase ultérieure de sélection triera. Le biologiste doit nécessairement prendre conscience de cette hiérarchie fonctionnelle, clef de voûte du fonctionnement informatique. Quoi de mieux, dès lors, que reproduire ces mécanismes par l'entremise des plates-formes informatiques proposées par la vie artificielle, seul réel moyen de permettre le défrichage de toute simplicité dissimulée, d'opérer cette lecture à plusieurs niveaux, et de dévoiler le bas en observant le haut. L'ingénieur est vivement encouragé à utiliser l'ordinateur dans ce qu'il a de meilleur, cette faculté infinie d'essais et d'erreurs. Il doit s'exclure de la boucle qu'il ne peut saisir, le temps pour l'ordinateur de proposer cette immense gamme de solutions au problème qu'il affronte. Il a ensuite tout loisir, comme l'enfant au jeu du « chaud et du froid », de guider l'ordinateur, car lui seul connaît *in fine* la nature du problème et lui seul est capable d'apprécier la qualité des solutions. C'est une synergie parfaite où les deux acteurs, pour peu que l'ingénieur reconnaisse la puissance de calcul de la machine mais compensée par sa finesse de jugement, se complètent idéalement.

Le philosophe, déjà, avait eu fort à faire avec la thèse fonctionnaliste de l'intelligence artificielle, tentant de le convaincre que la machine pourrait, à moyen terme, se confondre en tout point avec

un être conscient. Même la conscience, dernier bastion, finirait par déposer les armes au pied de l'ordinateur. Son système de défense extrêmement efficace, reposait sur la nature purement subjective du phénomène conscient. Comment peut-on honorer de conscience une machine, dès lors que la nature même de cette conscience la rend imperméable à l'analyse objective, préalable indispensable à la possibilité d'une quelconque réplique ? Il faut pouvoir extraire la conscience de soi et en faire un objet de science, par l'entremise d'une définition du phénomène accepté par tous, pour seulement se préoccuper de sa reproduction dans la machine. Or la conscience se prête mal à cet exercice d'objectivation. Qu'en est-il du vivant ? Le philosophe peut-il déployer la même stratégie défensive devant la thèse fonctionnaliste, attribuant, plus modestement, en place de la conscience, du vivant dans les machines ? Rappelons-nous que pour Descartes, l'animal en tant que machine était vivant mais non conscient. L'attribution du vivant pose au philosophe un problème d'une tout autre nature. Il s'agit de s'accorder sur une définition mécaniste qui fasse l'unanimité. Or celle-ci se heurte à plusieurs obstacles. Sans doute le plus lourd de conséquence est que toute définition mécaniste ou opérationnelle, à l'instar de l'auto-reproduction, le maintien homéostatique, le métabolisme, la dynamique évolutive, et bien d'autres, se trouve directement confronté à une version informatique du même phénomène. Il n'est pas du goût de tout le monde d'accorder à l'ordinateur l'accès au règne du vivant, ce qui aurait pour premier effet de désacraliser cette appartenance. S'il est impossible pour un ordinateur de savoir ce qu'il en est d'être une chauve-souris, vivre comme elle pourrait bien être plus à sa portée⁴.

⁴ Nagels, (T.) What's like to be a bat, *PhilosophicalReview*, 83, 1974, pp. 435-50