Vers une robotique animale

JEAN-ARCADY MEYER • AGNÈS GUILLOT

Renonçant provisoirement à construire des systèmes artificiels «intelligents», certains roboticiens s'appliquent à reproduire une caractéristique de la nature : l'adaptabilité. Leur modèle a cessé d'être l'intelligence humaine pour devenir l'évolution animale.

Au XVIIIe siècle, Voltaire, ébloui par le canard-automate de Jacques de Vaucanson, compara le savant à Prométhée tant il «semblait (…) prendre le feu des cieux pour animer les corps». Le volatile, qui buvait, se nourrissait, digérait, caquetait et s'ébrouait, n'était pas la première machine à imiter un animal, mais il illustrait de façon spectaculaire l'objectif déclaré de Vaucanson, qui cherchait «une reproduction de moyens en vue d'obtenir l'intelligence expérimentale d'un mécanisme biologique». Toutefois, cet automate, et ceux d'aujourd'hui, qui soudent, peignent, collent de façon précise et rapide, ne font qu'appliquer à la lettre les instructions : ils ne sont pas adaptatifs. Le moindre écart au programme prévu perturbe la machine.

Ce n'est qu'au début du XXe siècle que l'on dote des machines de capteurs afin qu'elles perçoivent des informations sur l'environnement. Les automates deviennent des robots dont les actionneurs leur permettent d'agir sur le milieu selon les informations captées. Les premiers sont des merveilles d'ingénierie, souvent inspirées des travaux de biologistes ou de psychologues. Le chien électrique élaboré par John Hammond et Benjamin Miessner en 1915 en est un exemple.

Pendant les décennies suivantes, plusieurs avancées théoriques mènent à l'avènement de l'intelligence artificielle. Par exemple, en 1943, Warren McCulloch et Walter Pitts démontrent que des neurones artificiels peuvent simuler des opérations logiques. En 1948, Claude Shannon montre que toute information peut être représentée au moyen de symboles compréhensibles par des ordinateurs. Deux ans plus tard, Alan Turing complète le principe d'une machine universelle qui traiterait des informations de la même façon que le cerveau humain. Le cadre conceptuel est prêt et l'on imagine que d'ici peu, l'intelligence humaine aura un équivalent «computationnel».

Dès 1956, des systèmes artificiels sont conçus pour modéliser l'intelligence humaine. Ils se présentent comme des cerveaux désincarnés, dotés de certaines «facultés cognitives» leur permettant d'effectuer des raisonnements, de faire une expertise, de manipuler des concepts abstraits ou de jouer aux échecs. Cependant, très vite, les limites de ces systèmes artificiels apparaissent. Ainsi, en 1963, le générateur de plans `General Problem Solver`, qui a pourtant vocation de résoudre tout type de problèmes, n'y parvient qu'avec ceux qui lui sont posés dans un formalisme favorisant la découverte de la solution. De même, en 1970, le système expert nommé MYCIN, spécialisé dans le diagnostic des maladies du sang, est évidemment incapable de s'apercevoir qu'un malade a une de ses artères tranchée !

Selon le philosophe Hubert Dreyfus, en 1972, le défaut de ces machines est de ne pas disposer des informations que l'expérimentateur juge inutiles parce qu'évidentes, c'est-à-dire le «sens commun». Une légende veut qu'un robot, en compétition avec un bébé pour construire une tour avec des cubes en bois, ait échoué, car il s'obstinait à placer d'abord le cube d'en haut, négligeant la pesanteur. En 1984, dans le cadre de l'un des derniers projets de l'intelligence artificielle dite classique, Doug Lenat et Ramanathan Guha, de l'Université d'Austin, ont tenté d'intégrer dans leur système, nommé `Cyc`, diverses informations, telles que «quand le président Lincoln était à Washington, son pied gauche l'était aussi», fournies par de nombreuses personnes. Toutefois le projet – créer une machine qui communique en langage naturel avec un être humain – n'a pas été à la hauteur des espérances. Il a été reconverti en outil de recherche de données sur `Internet`. Cet épisode a sonné le glas d'autres grandes réalisations de ce type, telle, par exemple, la machine à traduire universelle.

Un drôle de bestiaire

Plus généralement, `Cyc` et ses prédécesseurs étaient dépourvus des capacités adaptatives de base, celles qui sont communes à tous les organismes vivants afin d'acquérir eux-mêmes, dans leur environnement, les informations nécessaires. C'est grâce à de telles aptitudes que les animaux résolvent les divers problèmes de survie auxquels ils sont confrontés, telles l'exploration d'un environnement inconnu, la recherche de nourriture, la fuite devant un prédateur, etc. À l'instar de ce qui s'est produit au cours de l'évolution animale, la transposition de ces comportements chez un robot est un préalable à l'acquisition, efficace cette fois, de certaines facultés cognitives qui distinguent les êtres humains des autres espèces animales.

Aussi, ces dernières années ont-elles vu un renversement de paradigme. Certains roboticiens ont tourné le dos à l'intelligence artificielle classique et ont postulé qu'une machine ne devait plus être un «cerveau» isolé

© POUR LA SCIENCE - N° 300 OCTOBRE 2002

raisonnant sur des symboles au sein d'un environnement abstrait, mais plutôt un «corps», muni d'organes sensoriels et d'organes moteurs reliés par un «cerveau», confronté à un environnement réel. Dès lors, c'est sous l'effet des interactions permanentes de ses capteurs et de ses actionneurs avec l'environnement que ses mécanismes adaptatifs se mettent en place et s'améliorent. Un tel système artificiel autoadaptatif a été nommé animat, contraction d'«animal artificiel».

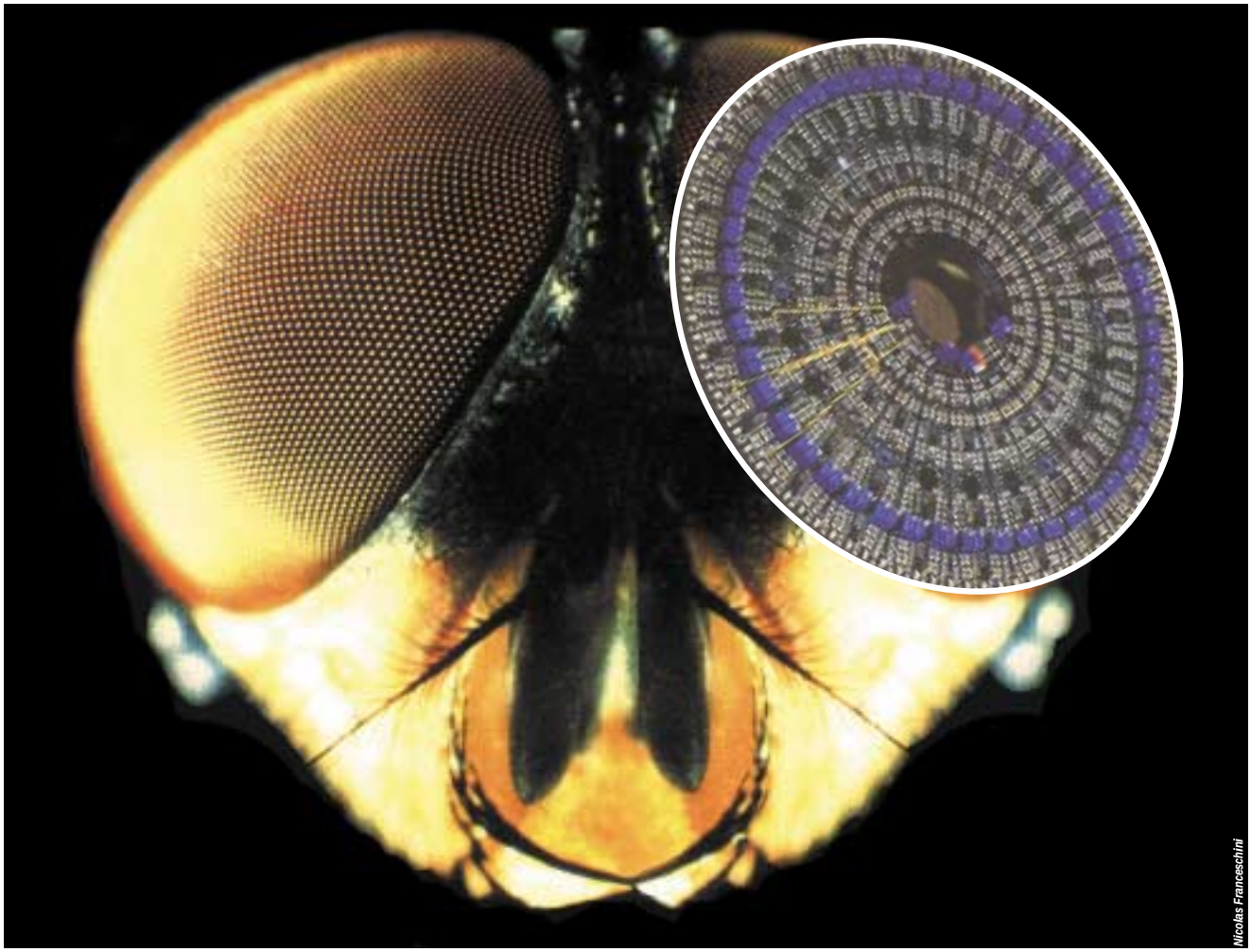
En 1986, un des pionniers en ce domaine, Rodney Brooks, de l'Institut de technologie du Massachusetts, a proposé que les nouveaux robots doivent se comporter comme le plus primitif des animaux avant d'espérer mieux. Nous avons nous-mêmes encouragé cette approche en organisant, en 1990, à Paris, la première conférence internationale sur ce thème : *Des animaux aux animats*. Depuis, de nombreux roboticiens s'inspirent de la nature pour concevoir l'anatomie et le fonctionnement de ces systèmes, mais aussi pour appliquer des processus adaptatifs, tels le développement, l'apprentissage et l'évolution.

Par cette démarche, on accède aux mécanismes qui concourent à la survie des animaux en se dotant de modèles physiques confrontés aux situations rencontrées par ces animaux. De surcroît, des robots adaptatifs et autonomes seront utiles pour la réparation d'une centrale nucléaire ou le prélèvement d'échantillons sur une autre planète, c'est-à-dire dans des situations où un agent artificiel doit assurer sa «survie» ou accomplir sa mission sans l'aide d'un humain, et dans un milieu imprévisible.

Ainsi, presque trois siècles après Vaucanson, l'inspiration biomimétique anime à nouveau les concepteurs de systèmes artificiels. Cependant, plutôt que de voler le feu céleste, ils préfèrent s'inspirer des astuces que la nature a découvertes au cours de l'évolution, afin que leurs créatures deviennent, non pas aussi intelligentes que l'être humain, mais aussi adaptatives que le plus simple des systèmes vivants.

Dans la conception des robots, les capteurs classiques, tels les détecteurs à infrarouge, ont alors été remplacés par des dispositifs inspirés des organes sensoriels des animaux. Par exemple, au sein du Laboratoire mouvement et perception du CNRS, à Marseille, Nicolas Franceschini équipe des robots volants de systèmes visuels dérivés de l'œil à facettes de la mouche *(voir la figure 1)*. Ces robots utilisent le flux visuel, c'est-à-dire la vitesse de défilement de l'image des obstacles sur la rétine, pour éviter les obstacles et atterrir.

Les systèmes de locomotion naturels inspirent aussi les roboticiens ; aujourd'hui, les machines constituent tout un bestiaire : elles empruntent leur mode de déplacement aux arthropodes, aux reptiles, aux amphibiens… Pris parmi



1. LES CAPTEURS DES ROBOTS d'aujourd'hui sont souvent inspirés de ceux des animaux réels. Ainsi, un système visuel artificiel *(placé sur l'œil gauche)* est inspiré de l'œil à facettes des mouches ; il est sensible au «flux visuel», c'est-à-dire à la vitesse de défilement des images. Ces animats sont éloignés des robots à vapeur conçus à l'ère victorienne *(voir la figure à côté du titre)*.

Michael Dickinson

2. UN ROBOT MOUCHE de 25 millimètres d'envergure est mis au point à l'Université de Berkeley. Sa conception est fondée sur l'étude des mécanismes du vol d'une mouche réelle.

d'autres, un robot grimpe aux murs en utilisant de très nombreux microcils adhésifs, à la façon de ceux qui équipent les extrémités des pattes du gecko. Brachiator, un robot de l'Université de Nagoya, au Japon, imite le mode de déplacement de branche en branche du gibbon. Ce robot singe apprend à coordonner ses mouvements afin de se balancer, de lâcher d'une main le barreau d'une échelle horizontale et d'attraper de l'autre main un barreau situé un peu plus loin. Il utilise son système visuel pour apprécier la distance à franchir et le balancement à effectuer.

Les capteurs et les actionneurs ne sont opérants que parce qu'ils sont reliés à un dispositif de contrôle, autrement dit, à une sorte de système nerveux. Rétrospectivement, on observe une ligne directrice, paradoxale, qui a guidé les travaux dans ce domaine jusqu'aux plus récents : l'être humain s'est peu à peu retiré de la conception des architectures de contrôle. Ces développements sont allés de pair avec les progrès de l'informatique, notamment en matière de puissance de calculs, mais aussi avec l'amélioration des réseaux de neurones artificiels. Ces neurones sont représentés par des programmes informatiques qui reçoivent des valeurs d'entrées et délivrent des valeurs de sortie. Reliés aux capteurs, aux actionneurs ou à d'autres neurones, ils tissent un réseau qui constitue le «cerveau» du robot.

L'émancipation des robots

Dans les premiers dispositifs, tous les paramètres d'un tel réseau étaient fixés et dérivaient – le plus souvent – des connaissances acquises en biologie. Dans un second temps, ont été élaborés des animats qui modifiaient eux-mêmes leur système nerveux par des étapes d'apprentissage, où des succès et des échecs précèdent des réajustements dans les connexions entre les neurones. Ici, l'architecture est figée et imposée par le concepteur ; en revanche, la force des connexions varie. Enfin, cette émancipation a atteint son apogée dans l'application, dès les années 1990, des algorithmes génétiques et autres méthodes évolutionnistes qui dérivent de l'évolution darwinienne. Pour ce faire, on teste l'efficacité d'une population d'une centaine de systèmes nerveux, élaborés au hasard, dans la tâche qu'un robot doit accomplir. Les plus mauvais sont éliminés, les meilleurs «engendrent» une deuxième génération qui résulte de croisements et de modifications aléatoires des systèmes retenus. Cette deuxième génération est à son tour testée dans les mêmes conditions que la précédente et le même processus de sélection-reproduction est répété. Après quelques milliers de générations, les systèmes nerveux élaborés confèrent à l'animat un comportement efficace. Le contrôle de la marche des robots canins et androïdes mis au point par la Société Sony relève notamment de cette robotique évolutionniste.

L'émancipation se poursuit et l'on tente de minimiser encore davantage le rôle du concepteur humain dans l'élaboration des systèmes de contrôle. Ainsi, des cellules nerveuses artificielles apparaissent, disparaissent et se relient au cours du développement d'un système complet et adapté. C'est par cette méthode qu'au sein de l'AnimatLab, à Paris, nous avons «appris» à marcher à un insecte artificiel de la même façon qu'un insecte réel. Plus remarquable encore, Hod Lipson et Jordan Pollack, de l'Université Brandeis, ont construit pour la première fois en 2000 un robot rampant *(voir la figure 3)* dont le système de contrôle, mais également la morphologie ont été conçus par évolution artificielle.

Peu à peu, grâce à ces procédures inspirées de la biologie, le roboticien peut espérer s'affranchir d'idées préconçues qui risquent de biaiser la conception de ses systèmes. Par exemple, il ne choisira bientôt plus la nature, le nombre et la position des capteurs visuels d'un robot ; ceux-ci seront plus efficacement déterminés sous la contrainte d'une sélection artificielle. En quelques heures de calculs, on reproduit plusieurs milliards d'années d'évolution !

Outre les propriétés évolutives utilisées pour leur conception, les robots sont de plus en plus petits. Aujourd'hui, il existe des microvéhicules autonomes, si petits qu'ils se déplacent sur une pièce de monnaie bien qu'ils soient pourvus d'une caméra, d'un microphone, d'une liaison radio, de capteurs, etc. Cette miniaturisation à l'extrême vise en particulier à satisfaire les besoins croissants tant civils que militaires en matière de microdrones et porte notamment sur de nombreuses variétés de robots autonomes à ailes battantes, inspirés du vol des insectes. L'objectif est de

Hod Lipson et Jordan Pollack

3. CE ROBOT a été conçu par des méthodes évolutionnistes, c'est-à-dire que son système de contrôle, mais aussi sa morphologie, ont été élaborés au terme d'une série de cycles où les meilleurs «individus» d'une génération sont conservés et autorisés à se «reproduire», alors que les moins performants sont éliminés.

produire des robots de très petite taille, capables de surveiller leur environnement sans être eux-mêmes facilement repérables et capables de planer afin d'économiser leur énergie. Par exemple, à l'Université de Berkeley, un insecte artificiel de 25 millimètres d'envergure (voir la figure 2) est en cours de réalisation, et s'inspire de l'aérodynamique de la drosophile.

Plus spectaculaire encore, une équipe de l'Université Cornell, a construit un hélicoptère de la taille d'une molécule, de l'ordre du milliardième de mètre, qui associe la partie motrice d'une molécule, l'ATPase, à des pales métalliques. Dans un avenir proche, ces nanomachines se déplaceront peut-être à l'intérieur de nos cellules pour, par exemple, y apporter des médicaments spécifiques.

Vers de nouveaux hybrides

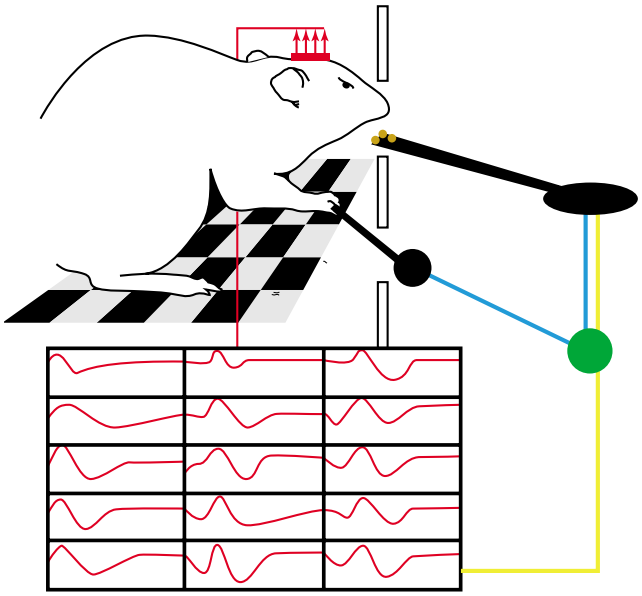
Ce dernier travail annonce la conception de systèmes hybrides entre le vivant et les machines, une autre voie de recherche biomimétique, née très récemment, et qui concerne les «biobots», dont les corps sont robotiques, mais dont les équipements nerveux et sensori-moteurs peuvent être issus du vivant. C'est le cas des robots mis au point à l'Université de Tokyo, qui sont équipés d'antennes prélevées sur le bombyx du mûrier. Grâce à elles, le papillon mâle détecte à longue distance quelques molécules de phéromones sécrétées par la femelle et peut ainsi la rejoindre. De la même façon, ces robots suivent une trace olfactive et se dirigent dans des environnements complexes.

Plutôt que de créer un contrôleur artificiel, des équipes italo-américaines ont connecté le système nerveux d'une lamproie aux capteurs lumineux et aux roues d'un robot mobile. Les circuits nerveux de l'animal apprennent à un robot à se déplacer vers une lumière!

Maintenir en vie un encéphale isolé n'est pas chose aisée, aussi les roboticiens du Centre Suny Health, à Brooklyn, ont opté pour un contrôle du robot par un cerveau in vivo, et sont parvenus à entraîner des rats à utiliser leurs ondes cérébrales pour déplacer un bras robotique (voir la figure 4).

Cependant, si l'on peut augurer de l'énorme intérêt de ces études, par exemple pour un contrôle moteur de prothèses par la seule activité cérébrale de personnes tétraplégiques, on peut tout aussi bien s'interroger sur l'éthique d'autres programmes mis en œuvre par ces mêmes chercheurs. En d'autres termes, si le contrôle d'une machine par un être vivant ne pose pas de problème moral, il n'en va pas de même quand une machine gouverne l'action d'un être vivant. C'est notamment le cas lorsque des biologistes télécommandent les déplacements d'un rat à l'aide d'impulsions électriques envoyées dans certaines zones de son système nerveux, même si l'objectif déclaré est d'utiliser ce rat pour détecter la présence éventuelle d'humains ensevelis sous des décombres.

Copier la nature en ce qu'elle a créé de mieux pour la locomotion, la perception et l'adaptation est certainement utile pour que des robots se comportent de façon autonome. Toutefois, une composante essentielle de la vie a longtemps été négligée par les roboticiens : l'autonomie énergétique. Aujourd'hui, les robots les plus perfectionnés, tel l'androïde SDR-4X ou le chien Aibo, ont une autonomie inférieure à quelques heures. Pour lever cette difficulté, des roboticiens américains et anglais ont construit des animats qui convertissent en électricité l'énergie produite par la digestion de sucres ou même de... limaces. Dans les années à venir, les roboticiens proposeront certainement d'autres solutions moins exotiques à ce problème fondamental.



4. DES RATS apprennent à déplacer un bras robotique «avec leur cerveau». Au début de l'expérience, les rongeurs appuient sur un manipulateur afin de positionner correctement un bras robotique qui leur délivre une récompense *(circuit bleu)*. Pendant l'appui, l'activité simultanée d'une cinquantaine de neurones des régions du cortex et du thalamus contrôlant le mouvement est analysée en temps réel pour déterminer quels signaux nerveux sont associés aux différents déplacements du bras *(circuit rouge)*. Puis, soudainement, les mouvements du bras et la délivrance de la récompense deviennent assujettis, non plus aux mouvements des rats, mais directement aux signaux neuronaux correspondants *(circuit jaune)*. Quelques animaux abandonnent alors le manipulateur pour n'utiliser que leurs ondes cérébrales pour obtenir la récompense.

Ils tâcheront aussi de mettre au point des animats polyvalents. Il s'agira surtout d'élaborer une architecture de contrôle qui autorisera un choix entre des actions parfois conflictuelles, répondant à des motivations différentes. Enfin, lorsque ces obstacles seront surmontés, peut-être verrons-nous apparaître, ce que beaucoup redoutent, des manifestations non prévues a priori par les concepteurs et ayant les mêmes fonctions que les émotions animales.

Depuis 15 ans, l'association de la biologie et de la robotique est prolifique et les résultats obtenus sont encourageants, parfois même étonnants. Ils ont enrichi nos connaissances dans les sciences du vivant. Par ailleurs, ils ont alimenté le débat sur le rôle adaptatif de diverses capacités cognitives, telles la vision attentionnelle, les représentations mentales, ou l'anticipation des conséquences des actions à venir en précisant dans quels environnements et pour quels types de problèmes les animats peuvent ou non s'en passer.

La robotique animale contribue ainsi à une meilleure compréhension des processus assurant l'adaptation et l'autonomie du vivant. Les capacités des robots, encore primitives, sont peut-être les prémisses d'une intelligence typiquement robotique, celle de *Robo sapiens*.

Jean-Arcady MEYER et Agnès GUILLOT mènent leurs recherches à l'AnimatLab du Laboratoire d'informatique de Paris 6. http://animatlab.lip6.fr