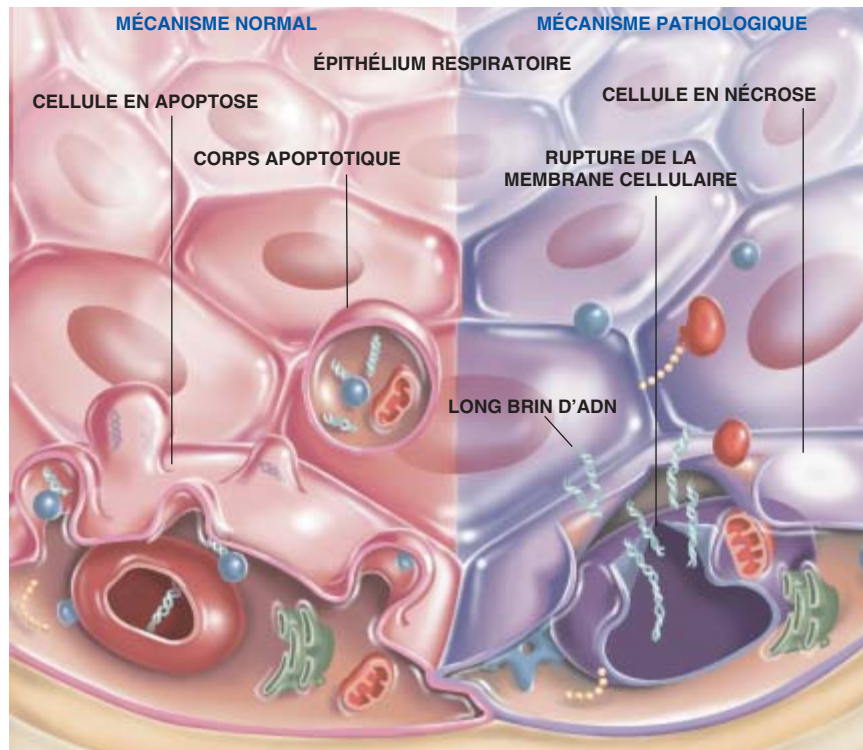


carbone pour produire l'énergie nécessaire à leur activité contractile. Elles utilisent un mécanisme de remplacement, la glycolyse anaérobie, qui a un faible rendement énergétique et entraîne l'accumulation de sous-produits du métabolisme, tels l'acide lactique et l'acide pyruvique, ce qui provoque une forte acidification intracellulaire.

Celle-ci est efficacement compensée par l'échangeur sodium/proton qui expulse les ions H^+ hors des cellules cardiaques. Malheureusement, le prix à payer pour le maintien du pH dans ces cellules privées d'oxygène est une accumulation massive d'ions Na^+ dans le cytoplasme, ce qui, dans ce cas, a des conséquences particulièrement néfastes. En effet, les cellules cardiaques sont des cellules excitables, qui se contractent dès que leur espace intracellulaire se remplit de charges positives. Dans des conditions normales, l'entrée des charges positives à l'intérieur des cellules cardiaques et leur sortie sont coordonnées dans l'espace et dans le temps. Cela aboutit à une activité contractile rythmique de l'ensemble du muscle cardiaque qui assure la circulation sanguine. Lors d'une acidification post-ischémique ayant déclenché une accumulation d'ions sodium par l'intermédiaire de l'échangeur sodium/proton, certaines régions du muscle cardiaque deviennent très positives, ce qui peut entraîner l'apparition de contractures étendues sur toute la région privée d'apport sanguin. À plus long terme, lorsque l'occlusion artérielle a été éliminée, cette surcharge de sodium déclenche parfois une activité contractile désordonnée, et des arythmies.

Quand ces arythmies sont fréquentes, elles se propagent à l'ensemble des fibres musculaires cardiaques, qui se contractent de façon désordonnée. Ce phénomène spectaculaire est nommé fibrillation et il est difficile à maîtriser. L'accumulation de sodium due à l'action de l'échangeur sodium/proton serait responsable de nombreuses morts subites par insuffisance cardiaque. Une petite ischémie transitoire se produisant chez une personne souffrant de troubles coronariens entraînerait, par ce mécanisme, un excès d'ions sodium dégénérant en arythmies, puis en fibrillation. Ainsi, nous sommes confrontés à une situation paradoxale, où l'activité d'un mécanisme chargé de la protection des cellules contre les acidifications peut être plus dangereuse que l'ischémie proprement dite.



6. LORS DE L'APOPTOSE normale des cellules, on constate que le milieu intracellulaire s'acidifie, de sorte que diverses protéines qui ne fonctionnent qu'en milieu acide sont activées. C'est notamment le cas des enzymes qui découpent l'ADN. Les cellules se fragmentent en petites vésicules dont le contenu est dégradé par des enzymes et qui finissent par être digérées par les macrophages du système immunitaire : le contenu cellulaire n'est pas déversé dans le milieu extracellulaire (à gauche). Au contraire, lors d'une nécrose pathologique, les cellules éclatent et leur contenu se répand dans le milieu extracellulaire : les longs brins visqueux d'ADN encombrement alors les espaces extracellulaires (à droite). Ainsi, le mucus bronchique des personnes atteintes de mucoviscidose est visqueux, car il contient de l'ADN non dégradé, ce qui cause des difficultés respiratoires. De surcroît, le contenu cellulaire déversé dans les voies respiratoires déclenche des réactions inflammatoires aiguës.

En effet, cette ischémie seule aboutirait à la nécrose d'une région limitée du cœur, sans perturber les propriétés contractiles de l'ensemble du muscle cardiaque. La connaissance de ce mécanisme pathologique, élucidé par M. Lazdunski, Paul Vigne et Christian Frelin, a ouvert une nouvelle voie de recherche pour l'élaboration de traitements des arythmies associées aux troubles coronariens. Le blocage de l'échangeur sodium/proton par des inhibiteurs spécifiques doit avoir des effets anti-aryth-

miques en cas d'ischémie cardiaque. De fait, plusieurs laboratoires privés ont récemment élaboré des inhibiteurs spécifiques de l'échangeur sodium/proton, tels que le cariporide et l'éniporide. Ceux-ci sont capables de supprimer de façon quasi totale les arythmies dues à une ischémie cardiaque chez l'animal. Ces molécules sont actuellement testées au cours d'essais cliniques chez des patients souffrant de troubles coronariens, et feront peut-être partie des anti-arythmiques de demain.

Laurent COUNILLON est maître de conférences, à l'Université de Nice – Sophia-Antipolis, dans l'unité CNRS UMR 6548.

Sous la direction de E. J. CRAGOE Jr, T.R. KELLYMAN, et L. SIMCHOWITZ, *Amiloride and its Analogs. Unique cation Transport Inhibitors*, VCH publishers, 1992.

J. KYTE, *Structure in Protein Chemistry*, Garland, 1995.

A. J. VANDER et al., *Physiologie Humaine*, troisième édition. Chenelière/McGraw Hill, 1995.

E. SHECHTER, *Biochimie et Biophysique des Membranes. Aspects Structuraux et Fonctionnels*, Deuxième édition, Masson, 1999.

Sous la direction de D.W. SELDIN et G. GIEBISCH, *The Kidney, Physiology and Pathophysiology*, Troisième édition, Lippincott Williams and Wilkins publishers, 2000.

L. COUNILLON et J. POUYSSÉGUR, *The expanding family of eucaryotic Na^+/H^+ exchangers*, in *Journal of Biological Chemistry*, vol. 274, n° 1, pp. 1-4, 2000.

La robotique évolutionniste

JEAN-ARCADY MEYER • AGNÈS GUILLOT

Des robots conçus automatiquement par évolution et sélection artificielles sont parfois plus performants que ceux conçus par des êtres humains.

En 1859, Charles Darwin publiait *De l'origine des espèces au moyen de la sélection naturelle*, où il décrivait le principe de l'évolution. Depuis, les mécanismes correspondants ont été précisés : des mutations apparaissent au hasard dans le génome des organismes vivants qui subissent la pression sélective du milieu. Quand une mutation est favorable, elle confère un nouveau caractère et l'organisme qui l'acquiert a plus de chances de se reproduire et de le transmettre à sa descendance ; à l'inverse, lorsqu'elle est défavorable, l'organisme meurt et le nouveau caractère disparaît. Ainsi, au fil des générations, de nouveaux

caractères apparaissent, se maintiennent, s'accroissent et donnent naissance à de nouvelles espèces.

Selon cette théorie, l'être humain et toutes les espèces vivantes résultent de tels mécanismes qui se déroulent depuis l'apparition de la vie sur la Terre, il y a environ 3,5 milliards d'années. Aujourd'hui, c'est au tour des machines : des informaticiens appliquent le principe de l'évolution à des robots ! Ainsi, par une sélection devenue artificielle, des populations de robots évoluent : leur morphologie et leurs comportements s'améliorent de génération en génération, et les robots sont parfois plus performants que les machines conçues par des êtres humains. Par exemple, un étudiant de l'Université d'Aarhus, au Danemark, a fait évoluer des systèmes de commande de robots destinés à jouer au football. Un robot ainsi mis au point par sélection artificielle a participé au championnat danois de robot-football en 1999, au cours duquel il a été opposé à des robots commandés par des programmes conçus par des informaticiens. Il est parvenu en finale, qu'il a perdue à cause d'une panne de batterie. Lors d'une revanche non officielle, il a défait son vainqueur par trois buts à zéro.

Nous examinerons dans cet article les principes qui régissent l'évolution des robots, les types de robots qui évoluent et la façon dont



ils s'améliorent. Ensuite, à travers divers exemples, nous décrirons des expériences où ces principes sont mis en œuvre et les comportements qu'ils confèrent. Nous évoquerons aussi les perspectives et les limites de la robotique évolutionniste.

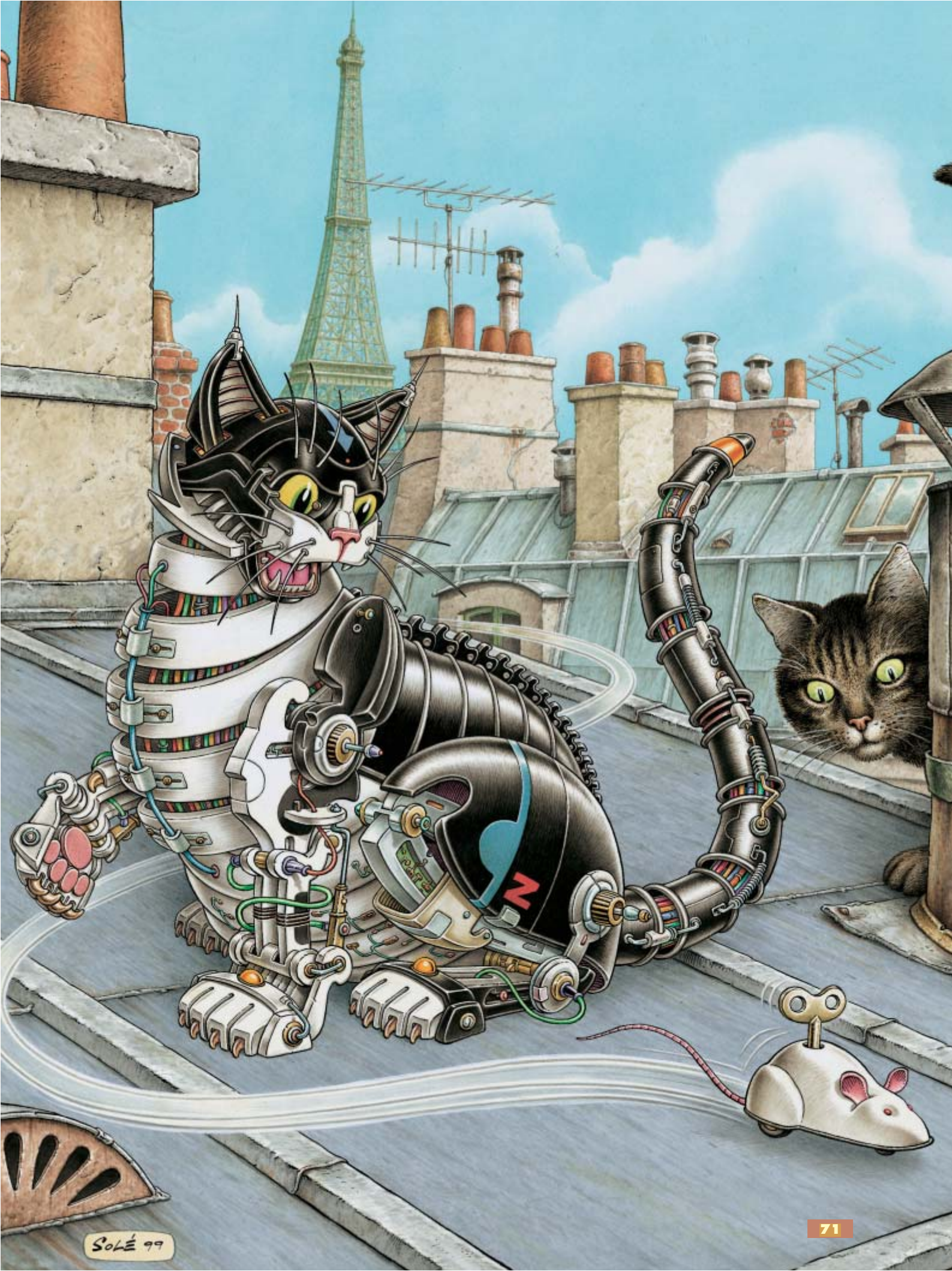
La sélection artificielle

La conception d'un robot capable de « survivre » dans un environnement changeant et d'y accomplir une tâche, même simple, est difficile, parce qu'il y a peu de principes théoriques sur lesquels s'appuyer et qu'il est impossible de prévoir toutes les difficultés que le robot risque de rencontrer au cours de son existence. C'est pourquoi, pour concevoir des robots bien adaptés à leur environnement, les roboticiens s'inspirent de la nature et étudient dans quelles conditions ces robots peuvent être conçus de façon semi-automatique. Il s'agit de minimiser l'intervention humaine, grâce à un programme d'évolution artificielle qui confronte des générations successives de robots à un environnement donné et qui sélectionne des robots de mieux en mieux adaptés. Entre chaque génération, le processus informatique modifie certains robots, dotés ainsi de nouveaux caractères, et les soumet à une « pression de sélection » qui favorise l'apparition des caractères recherchés par le roboticien.

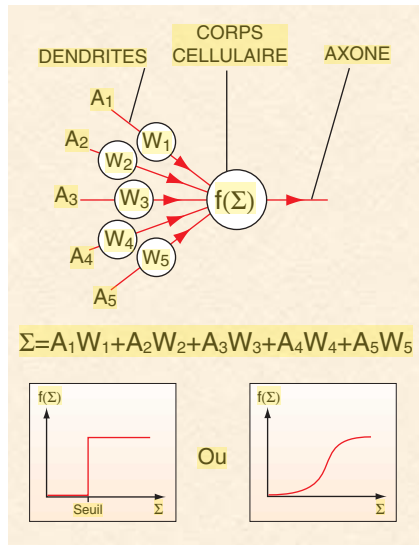
Toutefois, à l'inverse de la nature où l'univers des possibles est quasi infini, l'intervention humaine reste ici importante : l'expérimentateur détermine la tâche à accomplir, décide de



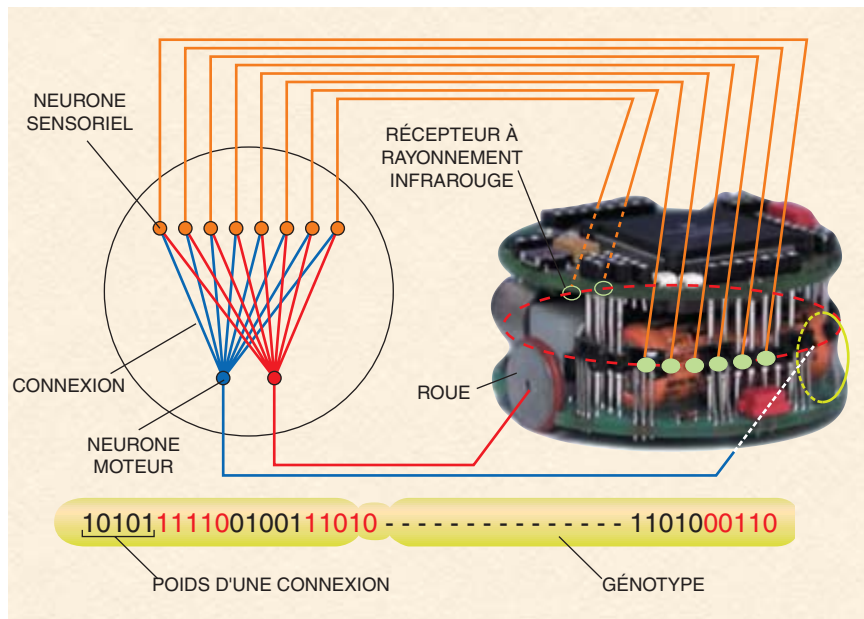
1. ELVIS, un robot de 60 centimètres de hauteur, coordonne sa vision binoculaire et les mouvements de ses membres grâce à un programme créé par un algorithme évolutionniste.



ce qui doit évoluer (le système de commande, la structure du robot...) et précise l'environnement dans lequel fonctionne le robot. Cependant, malgré ces restrictions, le caractère aléatoire des mécanismes évolutifs autorise de nombreuses possibilités.



2. UN NEURONE ARTIFICIEL reçoit des signaux (A) par ses dendrites. Chaque connexion est affectée d'un poids (W). Le neurone calcule la somme pondérée Σ des signaux reçus et la transforme selon une fonction f choisie par l'expérimentateur : dans certains cas, un signal n'est émis par l'axone vers les neurones en aval que lorsque Σ est supérieure à un seuil ; dans d'autres, la valeur du signal émis est d'autant plus grande que Σ est élevée.



3. LE RÉSEAU DE NEURONES qui commande le robot *Khepera* (à droite) est composé d'une couche de neurones sensoriels (en orange) ; chacun d'eux est relié à un récepteur à rayonnement infrarouge (en vert), et à une couche de neurones moteurs (en rouge et en jaune), chacun relié au moteur d'une roue. Chaque neurone d'une couche est connecté à tous les neurones de l'autre couche. Les poids des 16 connexions du réseau de neurones sont décrits par un génotype (en bas) de 80 bits (chaque poids est codé par cinq bits), que l'on soumet à un processus évolutionniste

Par exemple, dans une expérience où des robots hexapodes ont évolué et qui a été répétée plusieurs fois, une première population de robots a «redécouvert» la marche tripode des insectes, tandis qu'une seconde a inventé un mode de déplacement inédit, par sauts successifs.

La plupart des applications de la robotique évolutionniste ont porté sur des robots simples, le plus souvent de petits robots mobiles, nommés *Khepera* (voir la figure 3). Conçus à l'Institut fédéral de technologie de Lausanne, ces robots sont l'équivalent du rat de laboratoire pour les biologistes. Ils ont une forme cylindrique, d'environ six centimètres de diamètre et trois centimètres de hauteur. Dans leur version standard, ils sont équipés de deux roues et de huit récepteurs à rayonnement infrarouge grâce auxquels ils se déplacent et détectent les éléments de leur environnement, tels des obstacles ou une source de lumière. Ils sont parfois dotés en plus d'une caméra et d'une pince avec lesquelles ils repèrent, prennent et relâchent de petits objets. Toutefois, des robots plus complexes sont parfois utilisés en robotique évolutionniste.

Comme pour un organisme vivant, on distingue pour un robot son génotype de son phénotype. Le génotype est une description codée de ce robot

ou d'une de ses parties : c'est, par exemple, une chaîne de bits (0 ou 1) qui décrit son système de commande. Cette description, transmise de génération en génération, est l'objet sur lequel s'applique l'évolution artificielle. Le phénotype est l'organisation matérielle du robot, notamment sa forme, ses récepteurs et ses actionneurs, c'est-à-dire les éléments avec lesquels il perçoit le monde et agit sur lui, ainsi que son système de commande et son comportement.

Les réseaux de neurones artificiels

Le comportement d'un robot est guidé par plusieurs types de systèmes de commande possibles, qui sont reliés à la fois à ses récepteurs et à ses actionneurs. Le système de commande le plus utilisé est le réseau de neurones artificiels dont le fonctionnement est inspiré de celui du système nerveux d'un être vivant. Dans notre cerveau, par de nombreuses extensions ramifiées, nommées dendrites, un neurone reçoit des signaux, sous forme d'impulsions électriques, émises par d'autres neurones. En réponse, il émet un signal vers d'autres neurones par un unique prolongement, l'axone, lui aussi ramifié. Le signal, transmis d'un neurone à un autre par une synapse, est excitateur ou inhibiteur : selon la nature des réactions chimiques et selon les effets de seuil mis en jeu, le neurone transmet ou ne transmet pas une impulsion électrique vers les neurones auxquels il est connecté. Chaque neurone naturel traite en permanence des milliers de signaux synaptiques.

De même, dans un réseau de neurones artificiels, un neurone (voir la figure 2) reçoit plusieurs signaux d'entrée de la part de neurones en amont. Une importance variable est accordée à chacun de ces signaux, selon un coefficient affecté à la connexion correspondante que l'on nomme son «poids». Grâce à ces coefficients, le neurone calcule la somme pondérée de ces signaux, qui est ensuite transformée en un signal de sortie par une fonction f choisie par l'expérimentateur.

Au sein de certains réseaux, les neurones sont organisés en plusieurs couches : les neurones d'une couche reçoivent des informations d'une couche en amont et en transmettent à ceux d'une couche en aval. Cependant,