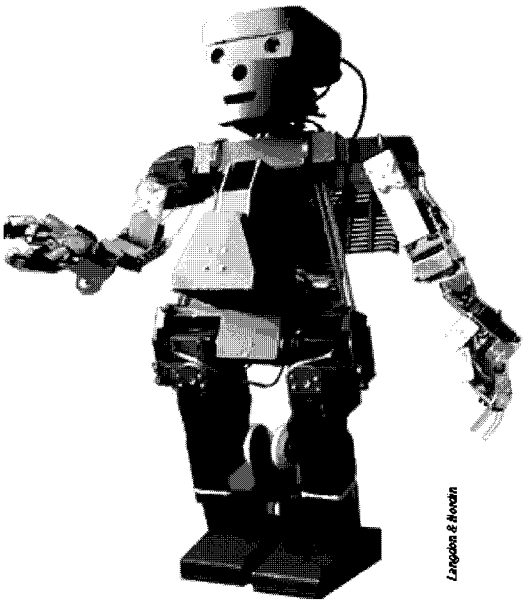
La robotique évolutionniste

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'accumulent et donnent naissance à de nouvelles espèces.



Langdon & Nordin

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.

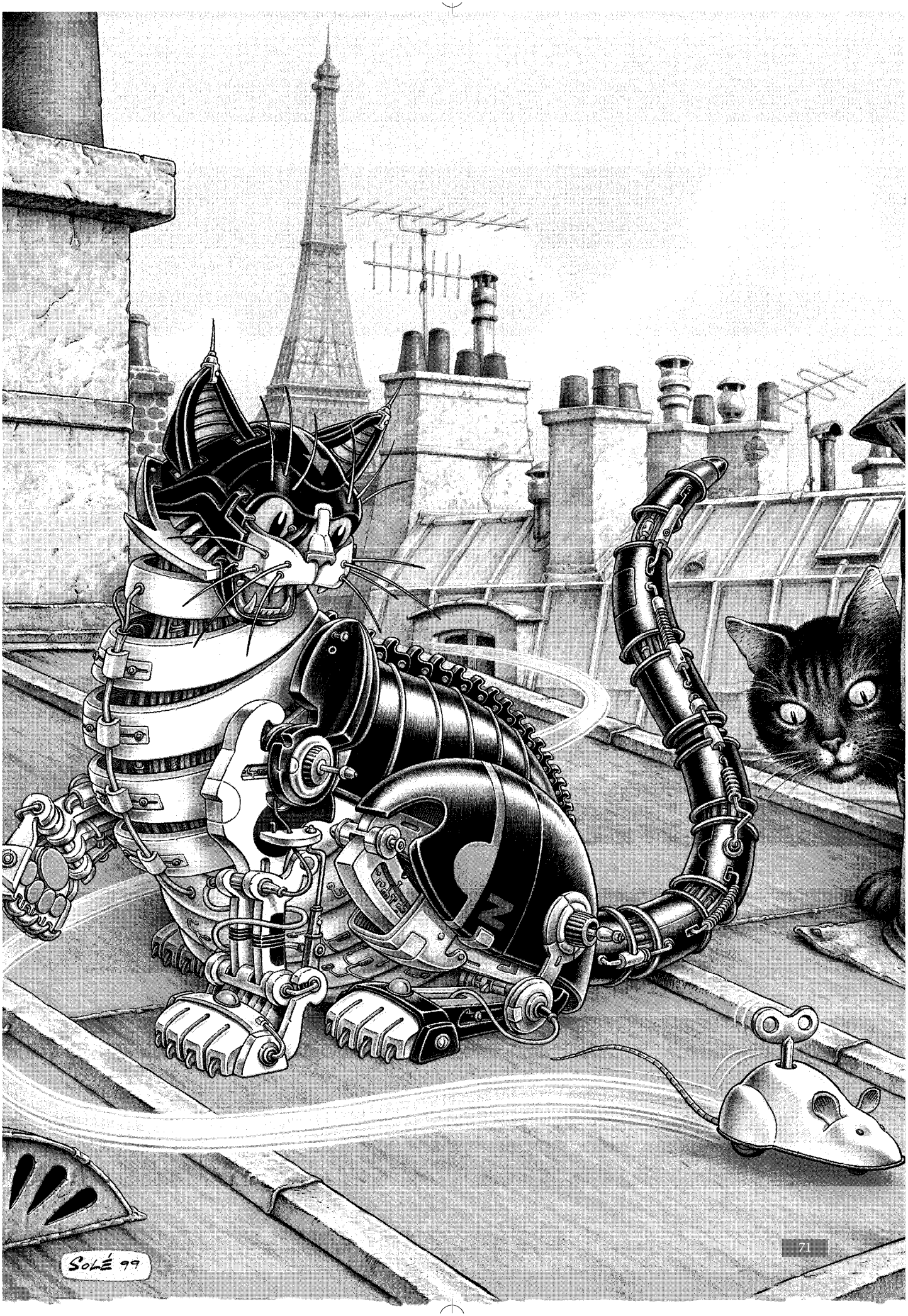
Selon cette théorie, l'être humain et toutes les espèces vivantes résultent de tels mécanismes qui se déroulent depuis l'apparition de la vie sur la Terre, il y a environ 3,5 milliards d'années. Aujourd'hui, c'est au tour des machines: des informaticiens appliquent le principe de l'évolution à des robots! 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.

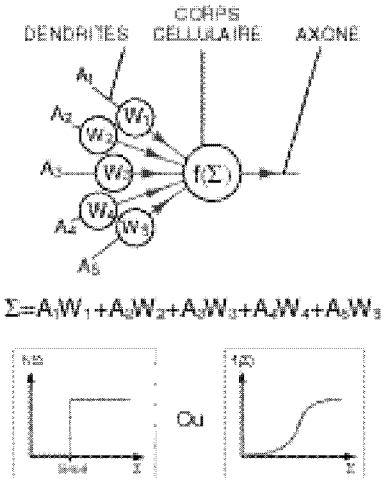
La sélection artificielle

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


SOLÉ 99

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.

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.

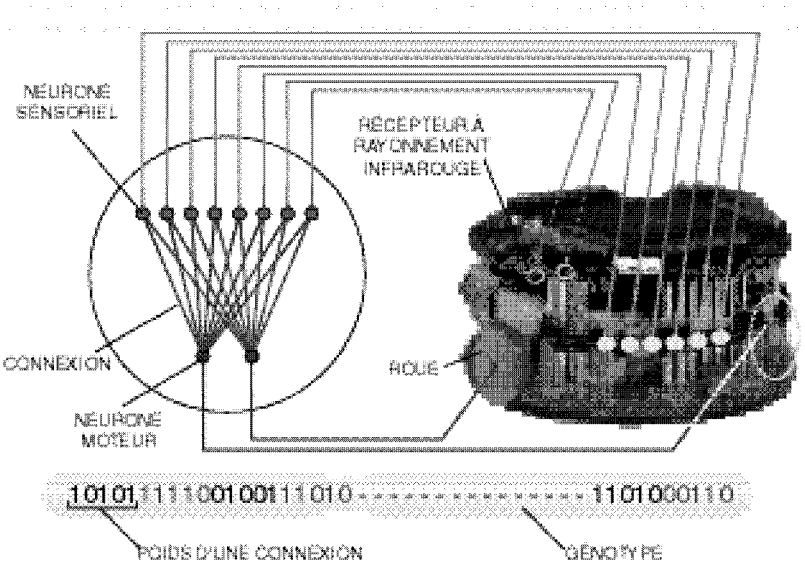
Comme pour un organisme vivant, on distingue pour un robot son génotype de son phénotype. Le génotype est une description codée de ce robot ou d'une de ses parties : c'est, par exemple, une chaîne de bits (0 ou 1) qui décrit son système de commande. Cette description, transmise de génération en génération, 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,



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

© POURLASCIENCE - N° 284 JUIN 2001

des réseaux de neurones aux configurations plus simples ou plus complexes sont aussi utilisés : par exemple, certains réseaux sont très peu connectés alors que d'autres présentent des boucles de rétroaction.

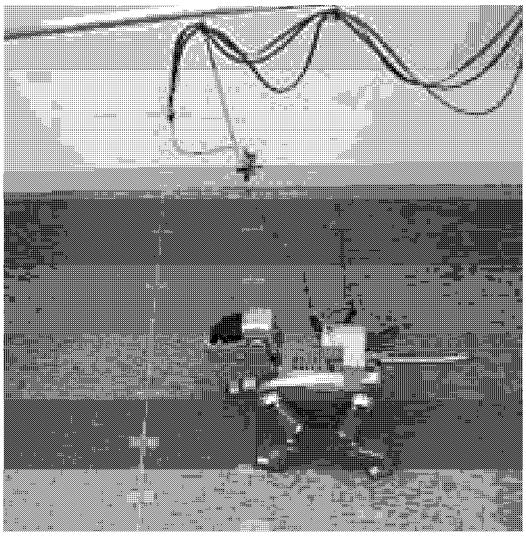
Dans le cas des robots, des neurones, dits sensoriels, reçoivent les données directement des récepteurs, tandis que d'autres neurones, dits moteurs, en émettent vers les parties actives du robot, tel le moteur d'une roue. Par exemple, le système de commande d'un robot *Khepera* peut prendre la forme d'un réseau de neurones composé de deux neurones moteurs et de huit neurones sensoriels. Chacun des neurones moteurs est relié à l'un des moteurs qui actionne l'une des roues du robot. Plus l'activité de ce neurone est élevée, plus la roue tourne vite. De même, chaque récepteur à rayonnement infrarouge du robot est connecté à l'un des neurones sensoriels du réseau : quand ce récepteur détecte un obstacle, le neurone correspondant est d'autant plus activé que la distance du robot à l'obstacle est faible.

Enfin, au sein d'un tel réseau, chaque neurone sensoriel peut être connecté à chaque neurone moteur. Dans ces conditions, 16 connexions relient la couche de neurones sensoriels à la couche de neurones moteurs. Les poids de chacune des 16 connexions, codés, par exemple, par cinq bits, sont déterminés par le génotype du robot : ce génotype se présente ainsi sous la forme d'une chaîne de 80 bits. L'influence de chaque neurone sensoriel sur chaque neurone moteur et, par conséquent, son influence sur le comportement global du robot dépend de la valeur du poids de chaque connexion. À chaque génotype correspond une combinaison spécifique de poids de connexions et donc un comportement propre du robot.

Les algorithmes évolutionnistes

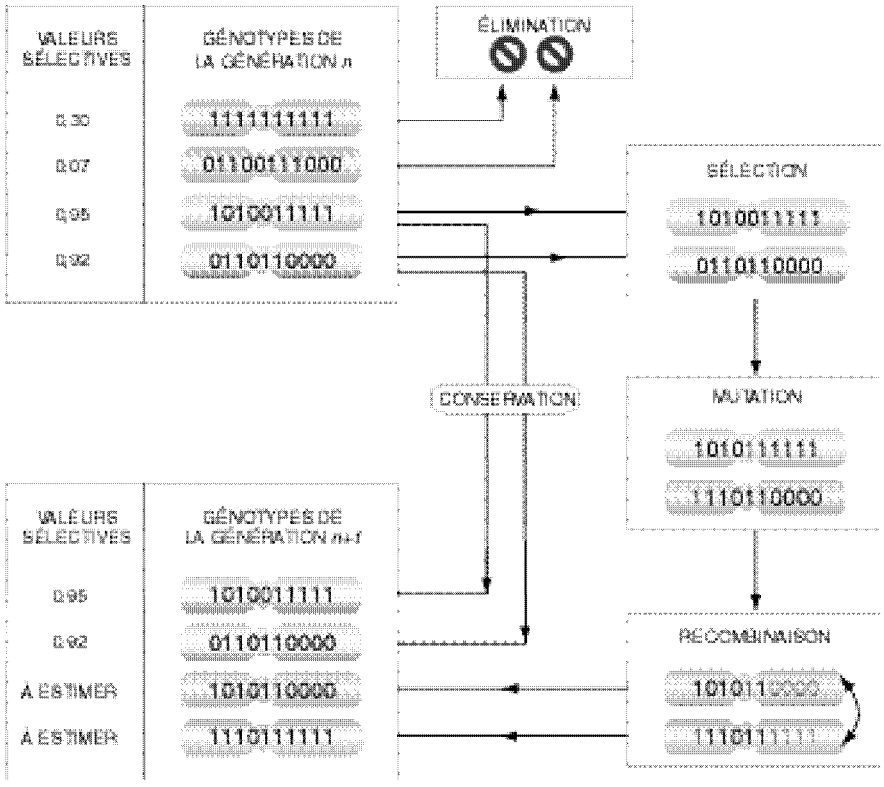
Il reste alors à mesurer les performances de chaque robot dans l'accomplissement d'une tâche donnée selon le réseau de neurones qui le commande. De telles performances sont quantifiées par une valeur, nommée valeur sélective, en anglais *fitness*, mesurée par l'expérimentateur sur un robot réel, ou déterminée automatiquement sur un robot simulé. Par exemple, pour des robots capables de se déplacer et d'éviter les obstacles, la valeur sélective correspond à la distance qu'ils parcourent sans heurter d'obstacle pendant un temps donné. Plus précisément, dans le cas d'un robot *Khepera*, la valeur sélective peut dépendre à la fois des vitesses de rotation de chaque roue, de la différence entre ces vitesses de rotation et du degré d'activation du neurone sensoriel le plus activé. Ainsi, la valeur sélective sera d'autant plus grande que les roues tourneront rapidement dans le même sens, et que le robot évitera un obstacle de plus loin.

Bien que l'expérimentateur humain décide de la façon dont le génotype d'un robot code son phénotype, le processus informatique d'évolution, nommé algorithme évolutionniste, est automatique. Seule la partie du phénotype codée par le génotype est modifiée au cours de l'évolution artificielle : le plus souvent, il s'agit du système de commande. Les génotypes évoluent de façon à ce que les phénotypes qu'ils décrivent obtiennent des valeurs sélectives de plus



Homdy

4. LE ROBOT CHIEN *AIBO*, de la Société *Sony*, a «appris» à marcher dans ce dispositif expérimental où son système de commande a été soumis à une évolution artificielle. Au fil des générations de contrôleurs, le robot s'est redressé, puis a marché d'un pas malhabile, pour enfin avancer d'un pas assuré.

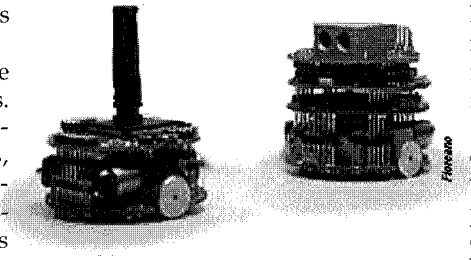


5. UN ALGORITHME ÉVOLUTIONNISTE opère sur une génération de génotypes dont les performances sont quantifiées par les valeurs sélectives. Lors du passage d'une génération *n* à une génération *n*+1, les génotypes qui ont les valeurs sélectives les plus élevées sont conservés intacts, alors que ceux qui ont les valeurs sélectives les plus faibles sont éliminés. Ils sont remplacés par les meilleurs modifiés par des mutations et des recombinaisons : les mutations remplacent un 1 du génotype en un 0, ou vice versa ; les recombinaisons échangent des fragments de deux génotypes. Les valeurs sélectives de chaque génotype de la nouvelle génération sont estimées lors d'expériences sur le robot réel ou sur des robots simulés.

en plus élevées et correspondent à des robots de plus en plus performants.

Un algorithme évolutionniste crée des générations successives de robots. Il opère sur une population de génotypes, souvent des chaînes de bits, dont les valeurs sélectives sont systématiquement évaluées, et il sélectionne les individus les plus performants dont les génotypes correspondants se maintiennent au sein de la génération suivante. À l'inverse, les génotypes des individus les moins performants sont éliminés. Ils sont remplacés par les génotypes des robots performants, qui ont subi des «mutations» et des «recombinaisons». Ainsi, une nouvelle génération est-elle constituée des génotypes les plus performants de la génération précédente, qui restent intacts, et des mêmes génotypes qui ont été modifiés.

Les «mutations» et les «recombinaisons», effectuées automatiquement par l'algorithme évolutionniste, introduisent de la nouveauté dans le système *(voir la figure 5)*. Dans les génotypes à valeur sélective élevée retenus, la mutation change un 1 de la chaîne de bits, choisi au hasard, en un 0, ou inversement, alors que la recombinaison échange des séquences de bits entre deux génotypes. Ces altérations sont effectuées de façon aléatoire par l'algorithme qui remplace automatiquement les génotypes à faible performance par les nouveaux génotypes ainsi obtenus. Les algorithmes évolutionnistes employés varient selon le codage des phénotypes, le mode de sélection des génotypes autorisés à se maintenir, les protocoles de remplacement des génotypes peu performants, etc.



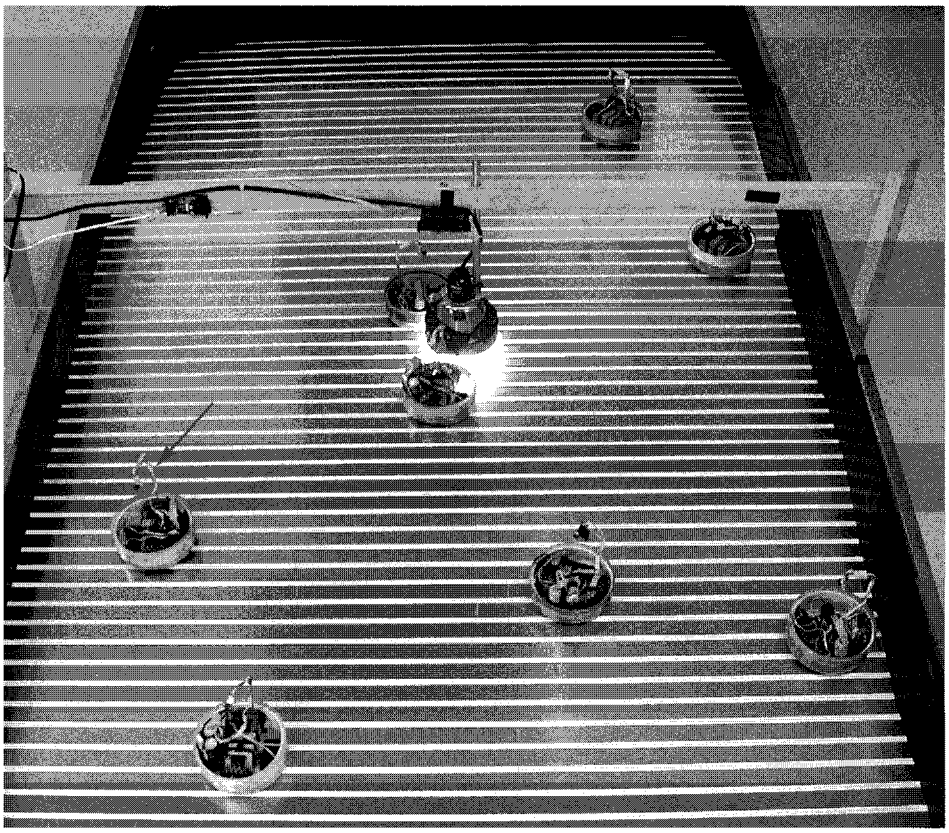
Floreano

6. UNE PROIE *(à gauche)* ET UN PRÉDATEUR *(à droite)* ont coévolué. La proie se déplace plus vite que le prédateur, mais est aveugle. En revanche, elle présente une protubérance que le prédateur détecte grâce à sa caméra. La proie doit échapper le plus longtemps possible au prédateur qui, lui, doit minimiser le temps de capture.

Parce que les génotypes initiaux de la population qui évolue sont souvent créés au hasard, les robots de la première génération, simulés ou réels, ont peu de chances d'être performants: leur valeur sélective est faible. Cependant, certains robots se comportent un peu moins mal que leurs congénères et sont donc autorisés à se maintenir, tandis que leurs versions modifiées remplacent les individus les moins performants ; la valeur sélective moyenne de cette population augmente généralement d'une génération à la suivante.

L'ensemble de ce processus – l'évaluation des performances de tous les robots d'une génération, la sélection des meilleurs, l'élimination des moins bons et de la création d'individus nouveaux par des mutations et des recombinaisons –, est réitéré de génération en génération. Lors de cette évolution artificielle, des robots de plus en plus performants apparaissent. Par exemple, lors de l'évolution de la marche de robots à pattes, les individus de la première génération, que leurs pattes ne soutiennent pas et qui ne font pas le moindre mouvement, sont remplacés par des robots qui se soulèvent, bougent et agitent une ou plusieurs pattes, puis par d'autres qui avancent de façon plus ou moins malhabile. Après un nombre variable de générations, ces derniers laissent la place à des robots qui se déplacent de plus en plus rapidement et dont le corps ne touche plus le sol. L'ensemble du processus est souvent arrêté, après quelques centaines de générations, lorsqu'un niveau de performance prédéterminé a été atteint et que le robot a, par exemple, parcouru une distance minimale en un temps donné.

Par ailleurs, l'évolution artificielle s'applique parfois au nombre de neurones, aux détails de leur fonctionnement interne et à l'organisation de leurs connexions. Elle est également employée pour d'autres systèmes de commande, par exemple des programmes informatiques qui déterminent directement le comportement d'un robot. De plus, selon les expériences, les génotypes utilisés codent plus ou moins de détails phénotypiques et sont par conséquent plus ou moins complexes. Il s'ensuit que les temps de calcul correspondants sont parfois longs.



Watson, Ficici & Pollack

7. DES ROBOTS ont évolué conjointement au sein d'une arène, dont le plancher était électrifié pour assurer leur autonomie énergétique. Ces robots ont réussi à rejoindre de plus en plus souvent une source lumineuse située au centre du dispositif expérimental. Au hasard des rencontres, un robot pouvait transmettre une partie de son génotype à un autre robot grâce à un émetteur récepteur de rayonnement infrarouge *(flèche)*.

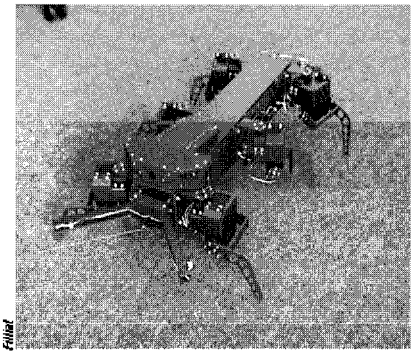
Pour remédier à cet inconvénient, il est possible de faire évoluer des systèmes de commande qui ne sont plus informatiques, mais électroniques. Pour ce faire, on utilise des circuits, dont les plus usuels sont nommés FPGA (pour *Field Programmable Gate Array*), qui sont organisés sur une grille contenant de 64 à plus de 10 000 blocs de calcul fondés sur des fonctions logiques élémentaires. Le fonctionnement individuel de ces blocs, mais aussi leurs interconnexions, sont précisés par le contenu d'une mémoire installée sur le circuit correspondant. Dans la mesure où le contenu de cette mémoire peut être décrit par un génotype, le fonctionnement d'un tel circuit est programmable et peut être soumis à une évolution artificielle. En particulier, ce fonctionnement peut être équivalent à celui d'un réseau de neurones, mais le système de commande correspondant est beaucoup plus rapide qu'un programme informatique, car, ici, seuls les calculs spécifiques à l'application sont exécutés et ne sont donc pas ralentis par ceux qu'impose le système d'exploitation de l'ordinateur.

Des robots élaborés

Certaines expériences de robotique évolutionniste ont porté sur des robots plus élaborés que les *Khepera*. Par exemple, dans le cadre d'une collaboration entre l'Université de Göteborg et l'Université de Londres, un programme de contrôle pour le robot humanoïde *Elvis (voir la figure 1)*, a été soumis à une évolution artificielle. Grâce à ce programme créé automatiquement selon le principe décrit précédemment, le robot coordonne les informations visuelles fournies par ses deux yeux et les ordres moteurs transmis à ses membres afin de pointer du doigt une source lumineuse. Des travaux en cours visent à créer de la même façon un programme pour la locomotion grâce auquel *Elvis* rejoindra une station de recharge lorsque ses batteries seront presque épuisées. À plus long terme, ce robot devrait communiquer avec les êtres humains.

De même, les ingénieurs de la Société *Sony* ont fait évoluer le système de commande de la locomotion du chien *Aibo (voir la figure 4)*. Au cours de ces expériences, le robot perdait souvent l'équilibre, et il a fallu lui changer de nombreuses pièces quand les contrôleurs des premières générations étaient testés. Néanmoins, des systèmes de commande pour la marche au pas ou pour le trot ainsi obtenus de façon automatiqueétaient plus performants que ceux programmés par les ingénieurs, parce qu'ils permettaient au robot de parcourir une plus grande distance en un temps donné.

La sélection artificielle a aussi été utilisée à l'Université du Sussex pour faire évoluer à la fois la morphologie du système visuel et le système de commande d'un robot. La nécessité d'une telle évolution conjointe découlait du problème à résoudre : le robot devait rejoindre un triangle affiché sur un mur après l'avoir distingué d'un rectangle affiché à côté. Le génotype de ce robot codait à la fois le nombre et la taille des récepteurs de son système visuel, et le nombre et les connexions des neurones de son système de commande. Les robots performants obtenus n'avaient besoin que de deux champs récepteurs pour distinguer les côtés verticaux du rectangle des côtés obliques du triangle. Cette information était ensuite exploitée par le système de commande qui guidait le robot vers le triangle.



Filliat

8. CE ROBOT HEXAPODE est commandé par un réseau de neurones qui a été créé par un programme de développement, lui-même découvert par un processus évolutionniste. Ce programme incluait des instructions qui provoquaient la création, la suppression et la modification de neurones ou de leurs connexions. Le robot marche à la façon d'un insecte (rythme tripode) et évite les obstacles.

Dans les divers exemples précédents, des robots évoluaient indépendamment les uns des autres. Toutefois, d'autres applications mettent en œuvre des processus de coévolution au cours desquels l'évolution d'une espèce dépend de l'évolution simultanée d'une ou de plusieurs autres espèces.

Ainsi, à l'Université de Lausanne, deux robots *Khepera* ont évolué ensemble : le premier jouait le rôle d'une proie et le second, celui d'un prédateur. La proie était aveugle alors que le prédateur était équipé d'une caméra grâce à laquelle il détectait la proie à distance. En revanche, la proie se déplaçait plus vite que le prédateur. Grâce à leurs récepteurs à rayonnement infrarouge, les robots repéraient les obstacles fixes ou mobiles de l'environnement dans lequel ils évoluaient, tandis qu'avec des capteurs de contact supplémentaires, les robots détectaient quand le prédateur avait «capturé» la proie, c'est-à-dire l'avait touchée. Le problème à résoudre était de sélectionner à la fois une proie qui échappait longtemps à la capture, et un prédateur qui attrapait vite la proie. Le génotype de ces robots codait les poids des connexions de réseaux de neurones à architectures prédéterminées qui reliaient les récepteurs aux moteurs *(voir la figure 6)*.

Au cours de telles expériences, le processus évolutionniste s'organise souvent en cycles successifs, durant lesquels diverses stratégies de poursuite et d'évasion se distinguent. Ainsi, pendant quelques générations, des prédateurs qui poursuivent directement les proies apparaissent. Cependant, les proies, plus rapides, «apprennent» à fuir dans la direction opposée aux prédateurs, pour qui une nouvelle stratégie de chasse s'impose. Ainsi, voit-on apparaître de nouveaux prédateurs qui ne poursuivent plus leur proie, mais qui observent ses déplacements et fondent sur elle sitôt que, pour éviter un obstacle, elle se dirige temporairement vers eux. Plus tard au cours de la coévolution, la stratégie des proies peut changer : les prédateurs les poursuivent alors de nouveau directement, car c'est le comportement le plus efficace. En retour, les proies fuient le prédateur en ligne droite, et le cycle se répète.

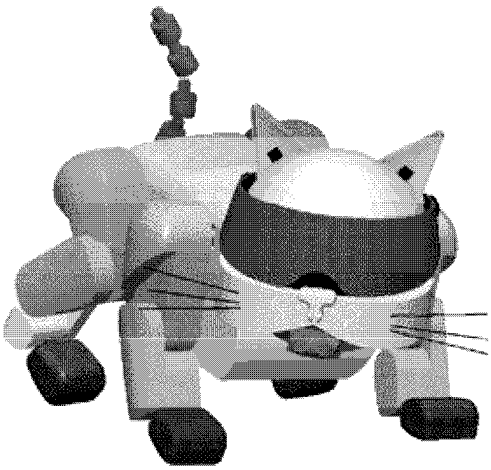
Dans une telle expérience, les valeurs sélectives des deux espèces évoluent de façon cyclique. En revanche, dans d'autres conditions, s'installe ce qu'on appellerait une «course aux armements» dans un contexte géopolitique s'installe : chaque compétiteur assimile et accumule les «astuces» comportementales découvertes par les individus des générations précédentes, et les valeurs sélectives augmentent régulièrement.

Dans une autre expérience, les informaticiens de l'Université de Brandeis ont fait évoluer les réseaux de neurones qui déterminaient le comportement de huit robots placés dans une arène carrée au centre de laquelle était

disposée une source lumineuse et dont le plancher était électrifié afin d'assurer l'autonomie énergétique des robots *(voir la figure 7)*. La tâche de chaque robot était d'utiliser ses récepteurs à la lumière et ses deux roues motrices de façon à rejoindre la source de lumière à partir de la périphérie de l'arène. Lorsqu'un tel événement se produisait, la valeur sélective du robot atteignait sa valeur maximale. Cependant, des programmes de comportement non soumis à l'évolution le forçaient ensuite à rejoindre la périphérie, d'où il devait à nouveau rejoindre la lumière. Pendant ce parcours, la valeur sélective du robot diminuait à mesure qu'augmentait le temps mis pour rejoindre la lumière.

Par ailleurs, lorsqu'un robot s'approchait d'un autre, il lui transmettait, grâce à un dispositif de communication à rayonnement infrarouge, une partie de son génotype avec une probabilité d'autant plus élevée que sa valeur sélective était grande : la description codée du poids d'une connexion du «donneur» remplaçait alors la description équivalente dans le génotype du robot «accepteur» et changeait donc le comportement de ce dernier. Une telle expérience simulait donc un écosystème artificiel dans lequel ni la valeur sélective des robots, ni le partenaire auquel chacun d'eux pouvait transmettre des fragments de génotype, n'étaient déterminés par l'expérimentateur. Néanmoins, à l'issue d'un tel processus automatique, les systèmes de commande obtenus assuraient à la population un taux moyen de rencontres avec la source lumineuse plus élevé qu'avec un système de commande conçu par un être humain.

Dans la nature, le codage du phénotype par le génotype est indirect : la transcription s'opère au cours du développement, pendant lequel l'environnement, par des mécanismes dits épigénétiques, influe sur l'organisation finale du phénotype. Ce processus de développement intercalé entre le génotype et le phénotype limite souvent la quantité d'information que doit contenir le génotype et donc diminue la taille de l'espace de recherche exploré par l'algorithme évolutionniste. Il est ainsi possible qu'un génotype simple code une morphologie et un système de contrôle très complexes.



9. *ROBOKONEKO* est un robot censé se comporter comme un chaton. Cependant, il n'a pas été possible à ce jour de faire évoluer l'organisation des millions de neurones artificiels de son système nerveux pour obtenir ce résultat.

Au sein de l'*AnimatLab*, du Laboratoire d'informatique de l'Université Paris 6, nous avons fait évoluer des robots dont le génotype code les règles de développement du réseau de neurones qui commande ces robots. Ces règles de développement sont décrites par un programme dont les instructions ont pour effet la duplication, la suppression ou la modification d'un neurone, la création ou la modification d'une connexion entre deux neurones. Grâce à ce procédé, nous avons produit, en deux étapes, des systèmes de commande de la locomotion et de l'évitement d'obstacles chez un robot à six pattes *(voir la figure 8)*. Lors d'une première étape, où la valeur sélective du robot était mesurée par la distance parcourue en un temps donné, l'évolution a découvert le programme de développement d'un réseau de neurones qui coordonnait le mouvement des pattes du robot de façon à ce qu'il se déplace en ligne droite. Pendant la deuxième étape, un autre réseau de neurones a été mis au point, grâce auquel le robot évitait les obstacles rencontrés le long de sa trajectoire. Connecté au premier, ce deuxième réseau utilisait des récepteurs qui détectaient le contact d'une des deux antennes du robot avec un obstacle. À ce moment, le robot devait être capable de modifier le rythme de déplacement de ses pattes afin de tourner du côté opposé à celui de l'antenne qui avait détecté un contact. Dans ces conditions, la valeur sélective d'un individu était d'autant plus grande qu'il s'était déplacé longtemps sans que son corps n'ait heurté d'obstacle. En simulation, nous avons obtenu un comportement supplémentaire, la poursuite d'une source odorante, à l'aide d'un troisième réseau de neurones relié aux deux précédents. La valeur sélective correspondante dépendait alors à la fois de la distance parcourue sans heurter d'obstacle et de la distance entre le robot et la source. De tels comportements ont été obtenus automatiquement en une nuit de calculs, tandis que trois ans avaient été nécessaires à Randall Beer, de l'Université Case Western, pour concevoir le système nerveux d'un insecte artificiel qui présente les mêmes comportements.

Perspectives et limites

Si les résultats déjà obtenus par la robotique évolutionniste sont prometteurs, il reste que des expériences ont connu des échecs. Par exemple, la tentative de faire évoluer le système nerveux de Robokoneko *(voir la figure 9)*, démarrée en 1994 dans le laboratoire de la Société *ATR*, à Kyoto, et récemment reprise par le Starlab de Bruxelles, a jusqu'ici échoué. Il s'agissait d'obtenir des comportements caractéristiques d'un jeune chat, tel que jouer avec un bouchon, miauler pour attirer l'attention, ronronner sous la caresse, etc.

Le système de commande de *Robokoneko* est censé être composé de 32 768 modules constitués chacun de 1 152 neurones inscrits sur 72 circuits FPGA. Cependant, pour des raisons techniques, il est impossible de faire évoluer plus d'un seul module à la fois. Bien qu'une machine spéciale ait été construite pour assurer une évolution aussi rapide que possible de tels modules, aucun comportement rappelant de près ou de loin celui d'un jeune chat n'a été obtenu à ce jour. Une des raisons de cet échec est liée à la difficulté de déterminer en fonction de quelle valeur sélective il convient de faire évoluer un module donné, puis de comprendre le fonctionnement interne de ce module et, enfin, de décider comment coordonner «à la main» son activité à celle de milliers d'autres

© POURLASCIENCE - N° 284 JUIN 2001

modules qui auraient évolué indépendamment de lui.

Les difficultés du projet *Robokoneko* posent la question des limites de la robotique évolutionniste : à quel degré de complexité des problèmes peut-on s'attaquer avec succès? Aujourd'hui, les comportements accessibles à cette discipline mettent en œuvre de simples réflexes qui permettent de marcher, nager, voler, éviter des obstacles, ou poursuivre un objet. En revanche, l'évolution de comportements plus élaborés, tels ceux qui nécessitent de la mémoire, des représentations de l'environnement ou une planification, pose des difficultés conceptuelles, méthodologiques et techniques dont on ignore encore si l'on saura toutes les résoudre.

Comprendre et exploiter les synergies que la nature met en œuvre lorsqu'elle associe l'évolution de l'espèce au développement et à l'apprentissage de l'individu est un autre défi de la robotique évolutionniste. À terme, grâce à des mécanismes équivalents, les robots seront non seulement *adaptés* aux caractéristiques de leur environnement qui changent lentement, mais aussi *adaptables* à des caractéristiques qui changent rapidement. De tels robots «survivront» et continueront leur mission, même en cas de panne de leurs récepteurs ou de leurs actionneurs, en cas de destruction d'une partie de leur système de commande ou en cas de transfert dans un environnement nouveau. L'évolution est en marche.

Jean-Arcady MEYER est Directeur de recherches au CNRS. Agnès GUILLOT est Maître de conférences à l'Université Paris X-Nanterre. Ils mènent leurs recherches à l'*AnimatLab* du Laboratoire d'informatique de Paris 6 (LIP6).

S. NOLFI et D. FLOREANO, *Evolutionary Robotics. The Biology, Intelligence, and Technology of self-Organizing Machines*, The MIT Press/Bradford Books, 2000.

T. GOMI, *Evolutionary Robotics. From Intelligent Robots to Artificial Life*, vol. I et II, AAI Books, 1998.

J.-A. MEYER, P. HUSBANDS et I. HARVEY, *Evolutionary Robotics : a Survey of Applications and Problems*, dans P. HUSBANDS et J.-A.MEYER, *Proceedings of The First European Workshop on Evolutionary Robotics -EvoRobot'98*, Springer Verlag, 1998.