

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 automatique étaient 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 neu-



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.

rones 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.

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.

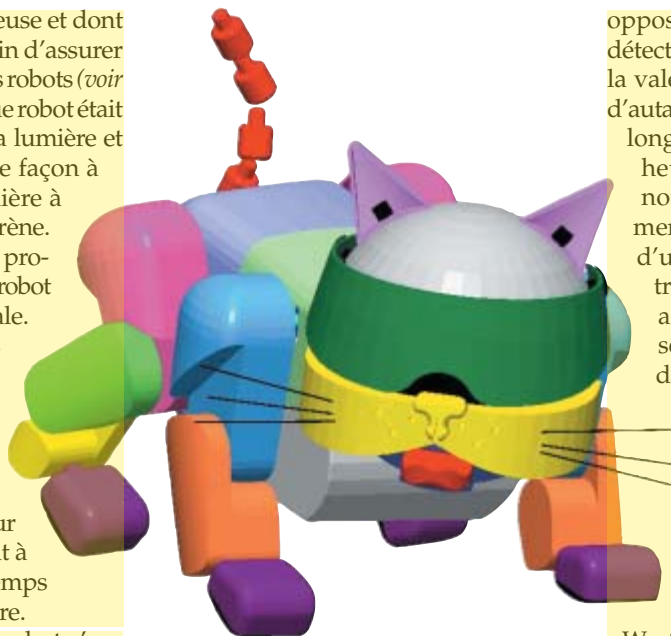
Dans une telle expérience, les valeurs sélectives des deux espèces évoluent de façon cyclique. En revanche, dans d'autres conditions, s'installe ce qu'on appellerait une «course aux armements» dans un contexte géopolitique s'installe : chaque compétiteur assimile et accumule les «astuces» comportementales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

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.

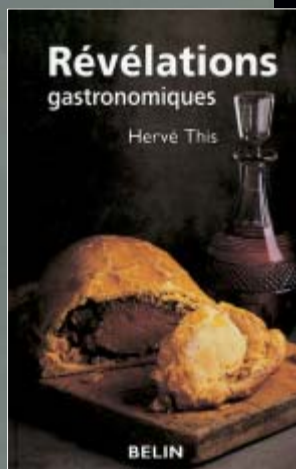
J.-A. MEYER, P. HUSBANDS et I. HARVEY, *Evolutionary Robotics : a Survey of Applications and Problems*, dans P. HUSBANDS et J.-A. MEYER, *Proceedings of The First European Workshop on Evolutionary Robotics -EvoRobot'98*, Springer Verlag, 1998.

Une nouvelle rencontre de la science et de l'art.



LES SECRETS DE LA CASSEROLE

Comment préparer plus de 20 litres de mayonnaise à partir d'un seul jaune d'œuf ? En explorant la physique des émulsions. Comment obtenir un bon rôti ? En empruntant à la chimie ses études des sucres et des acides aminés. Comment obtenir de bonnes gelées ? En reprenant les résultats récents de la physico-chimie des gels. Code 1585-130 F 224 pages



RÉVÉLATIONS GASTRONOMIQUES

Encore un livre de recettes ! Oui, mais des recettes garanties par des expérimentations rigoureuses, par des analyses physico-chimiques des aliments et des tours de main culinaires. Chaque geste culinaire est ici disséqué, commenté du triple point de vue culinaire, physico-chimique et gastronomique. Code 1756-130 F 320 pages

Ces deux ouvrages ont obtenu le Prix de l'Académie nationale de Cuisine 1997.

LA CASSEROLE DES ENFANTS

Laissés seuls pour la soirée, deux enfants doivent cuisiner leur dîner. Mais leur sens aigu de l'observation et de l'expérimentation leur fait découvrir les bases de la chimie et de la physique. Ce livre pourrait être un manuel, s'il n'évoquait les molécules et leurs transformations de façon si simple et si amusante.

Code 2309-80 F-128 pages



BELIN

Voir bon de commande page 98