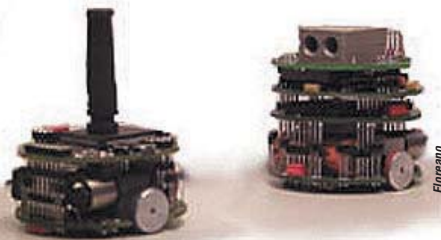


en plus élevées et correspondent à des robots de plus en plus performants.

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 muta-



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.

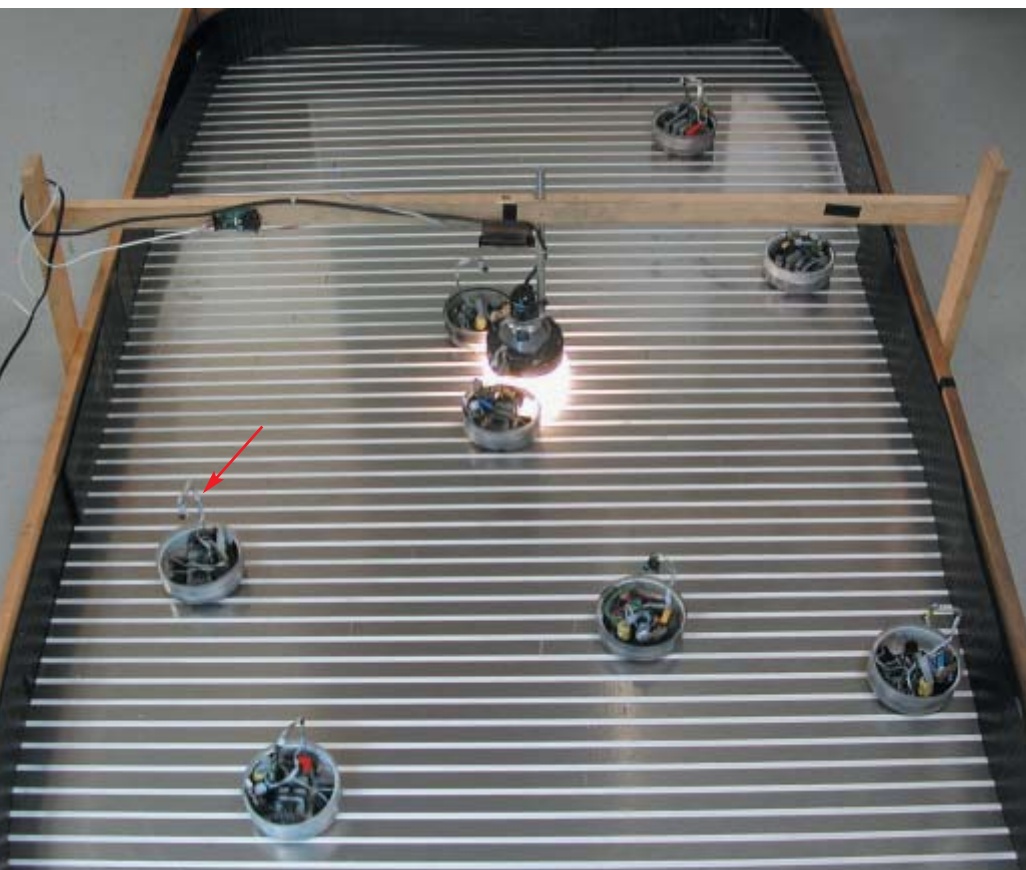
tion change un 1 de la chaîne de bits, choisi au hasard, en un 0, ou inversement, alors que la recombinaison échange des séquences de bits entre deux génotypes. Ces altérations sont effectuées de façon aléatoire par l'algorithme qui remplace automatiquement les génotypes à faible performance par les 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.

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.



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 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, voient 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