

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.

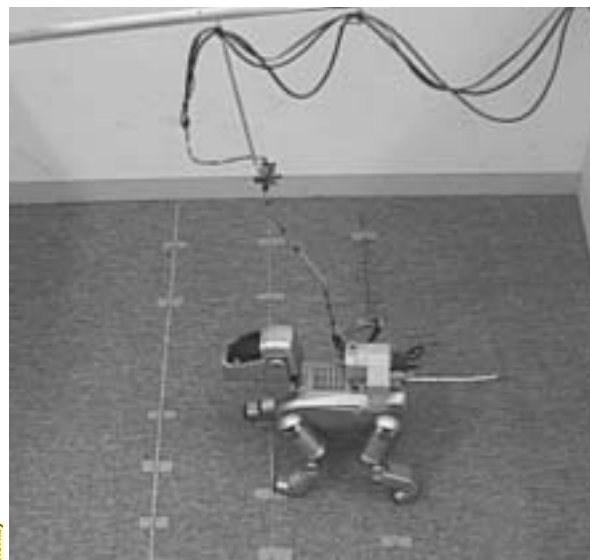
Enfin, au sein d'un tel réseau, chaque neurone sensoriel peut être connecté à chaque neurone moteur. Dans ces conditions, 16 connexions relient la couche de neurones sensoriels à la couche de neurones moteurs. Les poids de chacune des 16 connexions, codés, par exemple, par cinq bits, sont déterminés 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

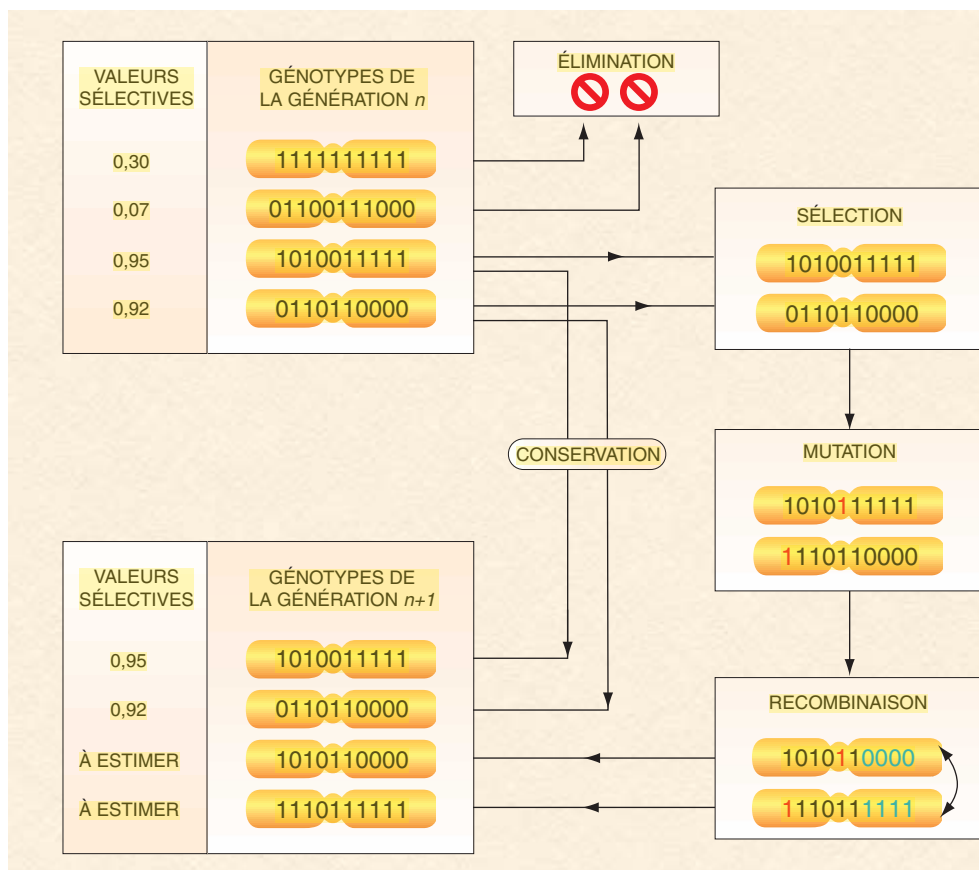
Il reste alors à mesurer les performances de chaque robot dans l'accomplissement d'une tâche donnée selon le réseau de neurones qui le commande. De telles performances sont quantifiées par une valeur, nommée valeur sélective, en anglais *fitness*, mesurée par l'expérimentateur sur un robot réel, ou déterminée 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



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.

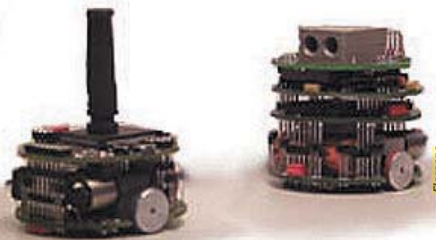


5. UN ALGORITHME ÉVOLUTIONNISTE opère sur une génération de génotypes dont les performances sont quantifiées par les valeurs sélectives. Lors du passage d'une génération n à une génération $n+1$, les génotypes qui ont les valeurs sélectives les plus élevées sont conservés intacts, alors que ceux qui 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 échantonnent 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 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.

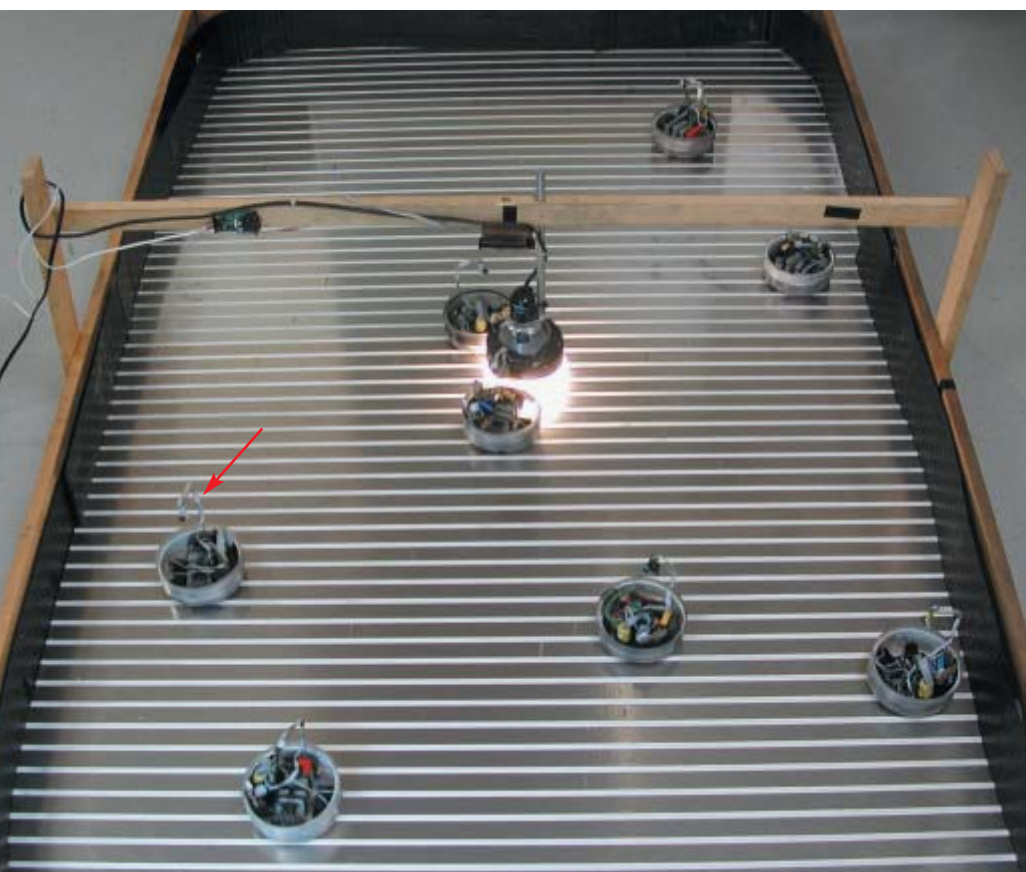
tion change un 1 de la chaîne de bits, choisi au hasard, en un 0, ou inversement, alors que la recombinaison échange des séquences de bits entre deux génotypes. Ces altérations sont effectuées de façon aléatoire par l'algorithme qui remplace automatiquement les génotypes à faible performance par les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