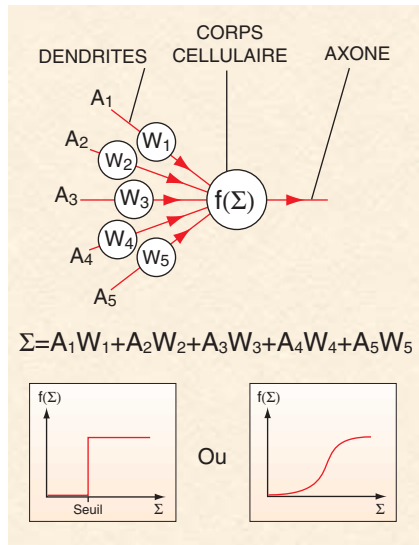
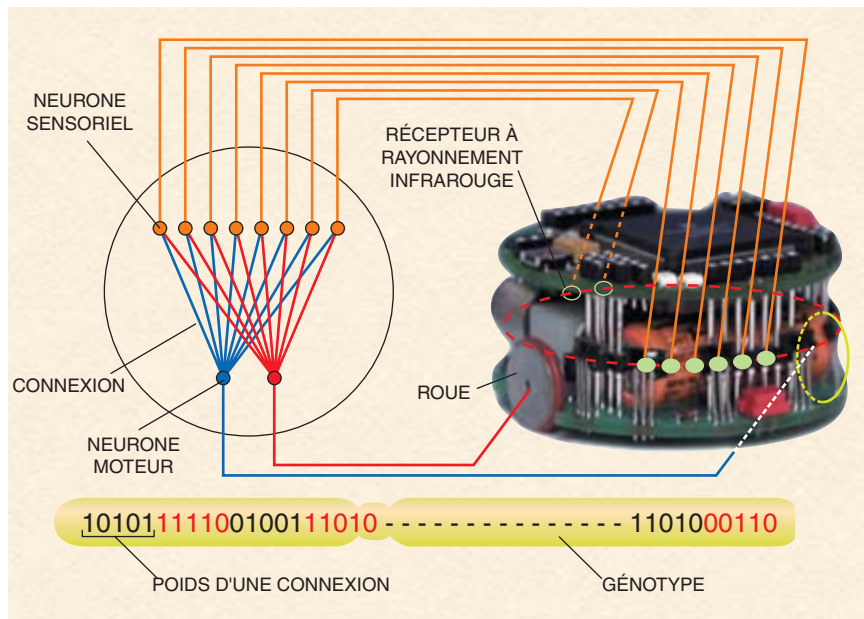


ce qui doit évoluer (le système de commande, la structure du robot...) et précise l'environnement dans lequel fonctionne le robot. Cependant, malgré ces restrictions, le caractère aléatoire des mécanismes évolutifs autorise de nombreuses possibilités.



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,

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.

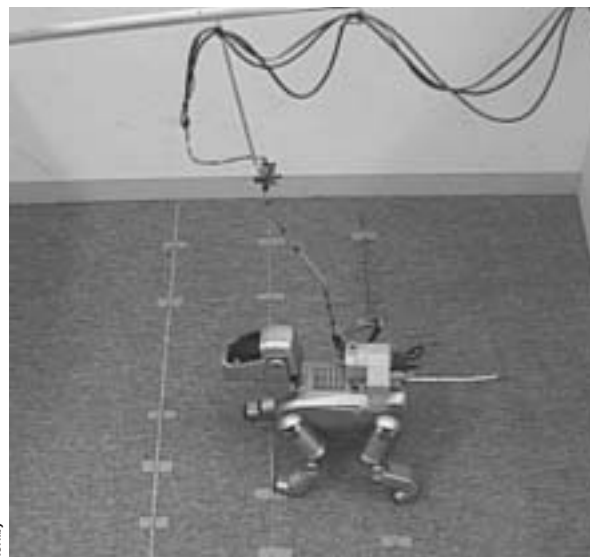
Enfin, au sein d'un tel réseau, chaque neurone sensoriel peut être connecté à chaque neurone moteur. Dans ces conditions, 16 connexions relient la couche de neurones sensoriels à la couche de neurones moteurs. Les poids de chacune des 16 connexions, codés, par exemple, par cinq bits, sont déterminés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

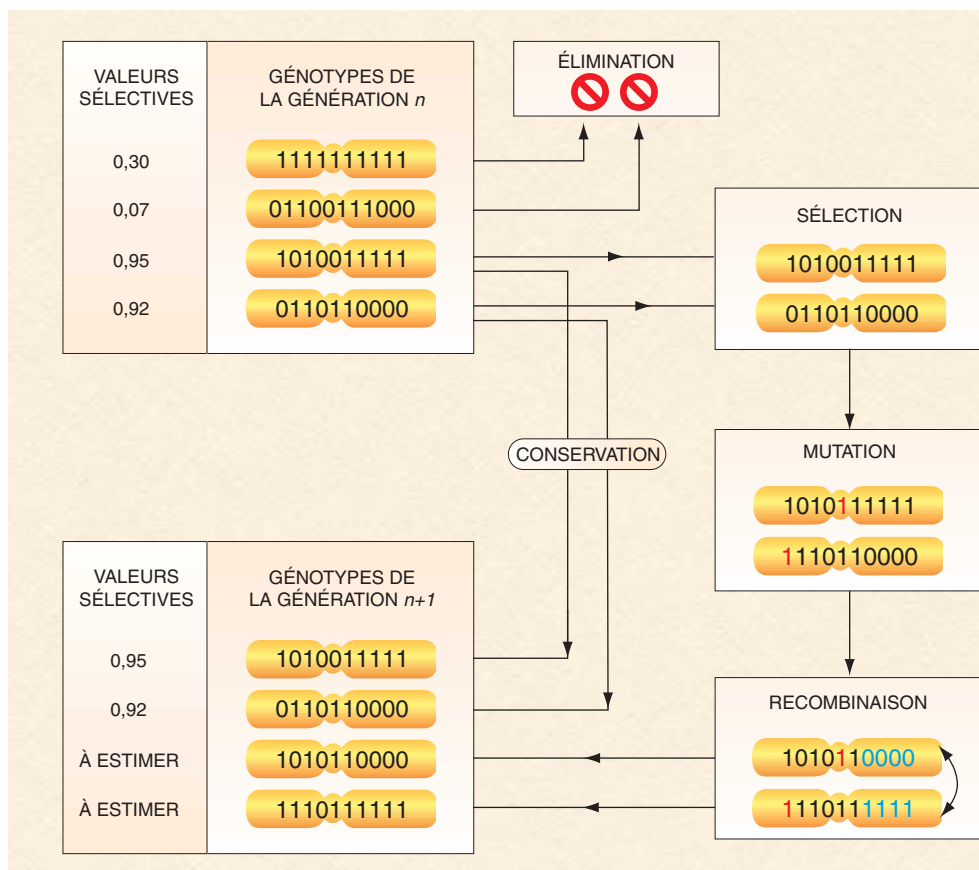
Il reste alors à mesurer les performances de chaque robot dans l'accomplissement d'une tâche donnée selon le réseau de neurones qui le commande. De telles performances sont quantifiées par une valeur, nommée valeur sélective, en anglais *fitness*, mesurée par l'expérimentateur sur un robot réel, ou déterminée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