

Un grillon robot

BARBARA WEBB

Un système électromécanique simple imite le comportement d'une créature vivante.

Le chant du grillon mâle attire puissamment les femelles : lorsqu'il se fait entendre, ces dernières peuvent marcher pendant plusieurs heures en direction de la source sonore, même si elles sont placées sur un tapis roulant qui les en maintient éloignées. Quoi de plus simple que ce comportement automatique ?

Pourtant cette simplicité n'est qu'apparente : un robot équipé de deux roues motrices indépendantes, par

exemple, rejoindra difficilement en ligne droite une source sonore située en face de lui. En effet, nous ne pourrions nous contenter de fournir la même puissance électrique aux deux moteurs, car leurs imperfections mécaniques, et celles de la transmission et des roues imposent un courant d'alimentation légèrement différent pour que les deux roues tournent à la même vitesse ; en outre, la puissance doit être constamment ajustée pour compenser

les forces de friction et d'inertie qui varient au cours du temps. Enfin, même si nous parvenions à faire tourner les roues à la même vitesse, nous devrions équiper le robot d'un dispositif qui compenserait les changements de direction provoqués par les inégalités du sol ou par des dérapages.

Au total, même les algorithmes de contrôle d'un trajet aussi simple qu'une ligne droite semblent complexes. Paradoxalement, un comportement qui semble complexe peut être commandé par un algorithme plus simple : plutôt que de forcer le robot à marcher en ligne droite, on peut le programmer pour atteindre son objectif en contournant les obstacles plutôt qu'en les franchissant.

C'est en suivant ce principe que nous avons construit, avec un matériel et des algorithmes simples, un robot qui imite le comportement complexe de l'insecte réel dans son environnement habituel : ce robot est un modèle réaliste des mécanismes neurobiologiques responsables de ce comportement. Pour simplifier, nous avons restreint les tâches du robot à celle décrite au début de cet



article : l'identification et la recherche par une femelle d'un mâle qui appelle.

La fréquence et le rythme

Comment les grillons femelles reconnaissent-ils le chant d'un mâle de leur espèce? Les grillons mâles produisent un son de fréquence bien déterminée, autour de 4,5 kilohertz, en frottant leurs ailes l'une contre l'autre : les femelles réagissent mieux à cette fréquence qu'aux sons de fréquence inférieure ou supérieure. De surcroît, le rythme du chant est une caractéristique de chaque espèce. Chaque frottement des ailes engendre un son, ou syllabe ; le rythme de répétition des syllabes par un insecte mâle est la caractéristique la plus déterminante pour la réaction d'une femelle de son espèce.

Dans de nombreuses espèces, enfin, le chant est structuré en motifs de trois à cinq syllabes, séparés par des périodes de silence. Toutefois, la plupart des femelles répondent à des syllabes répétées en continu et séparées par un intervalle de temps invariable.

Une femelle ne peut se contenter de reconnaître le chant des mâles de son espèce : quand plusieurs mâles chantent simultanément autour d'elle, elle doit en distinguer un seul et ne se diriger que vers lui. En laboratoire, les femelles semblent préférer les chants les plus sonores : confrontée à deux chants ayant tous deux le rythme approprié, une femelle se dirige vers le plus intense, qui lui signale le mâle le plus gros, ou simplement le plus proche.

Après avoir choisi un chant, le grillon femelle doit en atteindre la

source. Nous savons qu'une femelle a reconnu ou choisi un chant lorsque nous la voyons se déplacer vers celui-ci. Le comportement du grillon est donc reproductible avec un dispositif de localisation des sons qui ne réagit que pour certains types de son.

Comment le grillon entend-il? Ses oreilles sont placées sur ses pattes antérieures. Comme le corps du grillon absorbe peu les sons de basse fréquence, les deux oreilles reçoivent un son de même intensité, quelle que soit la direction d'où il provient. D'autre part, comme la longueur d'onde du chant est beaucoup plus grande que la distance entre les deux pattes, le décalage temporel dans l'arrivée du son est trop faible pour que les neurones auditifs du grillon le détectent.

En revanche, le son parvient à chacun des tympans par deux chemins différents : directement, par l'oreille, et, indirectement, à travers le réseau de tubes respiratoires (trachées) ouverts sur l'extérieur par deux rangées symétriques d'orifices, de chaque côté du corps (voir la figure 2). Au niveau des oreilles, en arrière des deux tympans, les trachées forment une cavité qui permet à ceux-ci de fonctionner comme la

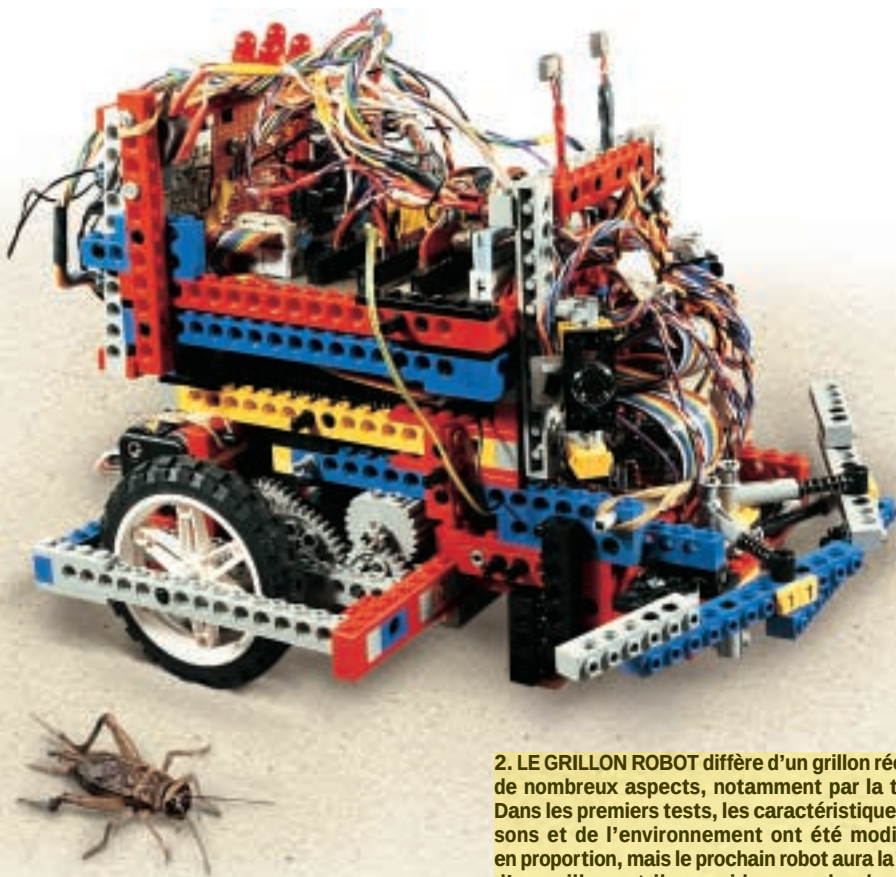
peau d'un tambour. Les deux ondes qui parviennent sur un tympan en suivant ces deux chemins parcourent des distances différentes : elles sont déphasées. Leurs interférences renforcent ou suppriment la vibration du tympan : l'amplitude de celle-ci est supérieure du côté le plus proche du son, ce qui indique à l'animal la direction d'où provient le son.

Enfin le réseau respiratoire qui relie les oreilles du grillon aux orifices trachéens est construit de telle sorte qu'il crée des déphasages adaptés aux caractéristiques du chant de l'espèce : le dispositif ne détecte pas de façon fiable la direction des sons d'autres fréquences. Le système auditif du grillon ignore donc, par construction, les mauvaises fréquences, dont il ne détermine pas la direction de la source.

Comment reproduire ces mécanismes afin de vérifier les hypothèses physiologiques? Nous avons construit en pièces de Lego un petit véhicule de forme cubique, d'environ 20 centimètres de côté. Il a deux roues motrices



1. CE GRILLON ROBOT reproduit l'un des comportements du grillon femelle : la localisation d'un mâle d'après son chant. Dans les expériences, le robot se déplace vers un haut-parleur qui produit une émission sonore semblable au chant d'appel du grillon mâle. Comme un véritable grillon femelle, le robot analyse les sons dès qu'il les «entend» et corrige sa trajectoire. Il zigzague jusqu'au haut-parleur comme le ferait un grillon femelle se dirigeant vers un partenaire ; la longueur de la trajectoire est toujours inférieure au double de la distance entre le point de départ et le haut-parleur.



2. LE GRILLON ROBOT diffère d'un grillon réel par de nombreux aspects, notamment par la taille. Dans les premiers tests, les caractéristiques des sons et de l'environnement ont été modifiées en proportion, mais le prochain robot aura la taille d'un grillon, et il se guidera sur le chant de l'animal.

Grillon : Robert P. Carr, Bruce Coleman Inc. Robot : Barbara Webb

de son seuil de décharge, recommence plus rapidement à décharger.

Les femelles ont ainsi deux moyens de se diriger vers le son : à chaque syllabe, soit elles se tournent du côté où la décharge a commencé en premier, soit elles se tournent du côté où le nombre de décharges est supérieur (le résultat est identique dans les deux cas). Dans la première hypothèse, la réaction ne se produit qu'au début d'une syllabe. C'est effectivement le cas, car la répétition des syllabes est bien le facteur qui détermine principalement la réaction des femelles. Quand le son est continu ou se répète plus rapidement que le temps de relaxation des neurones, ceux-ci déchargent en permanence, et la détermination du côté dont le neurone intermédiaire a commencé à décharger en premier devient impossible. En revanche, quand les syllabes sont répétées trop lentement, l'information sur la direction où tourner arrive moins fréquemment, de sorte que la femelle ne parvient pas à se diriger vers le mâle. Le rythme idéal de répétition est situé entre ces deux extrêmes.

L'autre mécanisme possible, l'orientation sur la plus grande fréquence de décharge, indique la direction du son quel que soit le rythme de répétition des syllabes. Il faudrait alors admettre que les grillons possèdent d'autres processus neuronaux pour distinguer les chants ayant le rythme approprié. Ce mécanisme a toutefois la faveur des neurophysiologistes, car on a identifié des neurones du cerveau du grillon qui exerceraient ce contrôle.

Le plus simple

Avec notre robot, nous avons choisi de tester le premier mécanisme, car c'est le plus simple : nous avons équipé le robot d'un système sensoriel qui ne fonctionne que pour un chant de fréquence et de rythme donnés, sans traitement supplémentaire du signal. Le «cerveau» du robot est un microprocesseur qui envoie des commandes de marche et d'arrêt aux moteurs latéraux et qui reçoit des signaux de plusieurs capteurs : outre les microphones et le circuit qui simule le retard et l'annulation de phase dans le système auditif du grillon, le robot est équipé de capteurs infrarouges et de capteurs de choc qui détectent les obstacles. Au total, le programme du robot ne contient qu'une centaine d'instructions.

latérales et une roue directrice à l'avant. Comme il est beaucoup plus grand qu'un grillon, ses oreilles (de petits microphones) sont plus écartées. Nous avons donc ramené la fréquence du chant à deux kilohertz. Un circuit électronique traite les sons comme le système auditif d'un grillon : il produit, toutes les 30 millisecondes, un signal qui correspond à la vibration du tympan. Ce signal a une amplitude supérieure du côté de la source sonore, pour les sons de la bonne fréquence. En pratique, toutefois, les oreilles du robot n'indiquent la bonne direction que dans 90 pour cent des cas, en raison des bruits parasites dans les haut-parleurs, dans la pièce et dans les moteurs du robot.

Deux neurones cruciaux

Comment utiliser, maintenant, la différence d'amplitude de vibration des tympanes afin de diriger le robot ? Pour chaque oreille du grillon, environ 50 neurones sensoriels convergent vers un petit nombre de neurones intermédiaires, dans le système nerveux central de l'insecte. Deux de ces neurones intermédiaires, l'un relié à l'oreille

gauche, l'autre à l'oreille droite, forment une paire qui semble cruciale pour l'orientation vers les sources sonores : en mesurant et en manipulant l'excitation de cette paire de neurones pendant que l'animal marche vers une source, des neurophysiologistes ont établi que l'animal tourne toujours du côté du neurone intermédiaire le plus excité.

Quand une syllabe parvient à une oreille, les influx produits par les neurones sensoriels de cette oreille s'accumulent dans le neurone intermédiaire correspondant. Quand un certain seuil est atteint, le neurone intermédiaire décharge (à son tour, il émet des influx nerveux) plusieurs fois au cours d'une même syllabe. Le délai entre la réception du son et la première décharge, ainsi que le nombre de décharges pendant une syllabe, dépendent de l'intensité des influx reçus par le neurone (elle-même proportionnelle à l'amplitude de vibration du tympan). Ces deux paramètres de l'activité des neurones codent donc la vibration des tympanes. À la fin d'une syllabe, le neurone revient progressivement au repos. Si un autre son est capté pendant ce temps de relaxation, le neurone, encore proche