

Ce programme additionne les signaux de sortie du circuit auditif. Lorsqu'un côté atteint le premier un seuil prédéterminé, la roue de ce côté est brièvement stoppée : le robot tourne. Quand le son persiste, la somme reste supérieure au seuil et ne déclenche aucune réaction supplémentaire : le robot poursuit son chemin dans sa nouvelle direction. Lorsque le son s'arrête, la somme s'annule progressivement, simulant la période de récupération du neurone du grillon. Ainsi, seul un son discontinu et répétitif provoque une réponse assez fréquente pour que le robot se dirige en direction du son.

Comme le robot traite les sons plus lentement qu'un grillon, nous lui avons fait entendre un chant dont le rythme, à 300 millisecondes par syllabe, est inférieur d'un facteur dix environ au rythme naturel. Toutefois le robot tourne et avance aussi vite qu'un vrai grillon : sa tâche est plus difficile. Nous supposons que, si le robot ainsi construit trouvait la source d'un son, les mêmes mécanismes pourraient contrôler le comportement d'orientation chez les grillons.

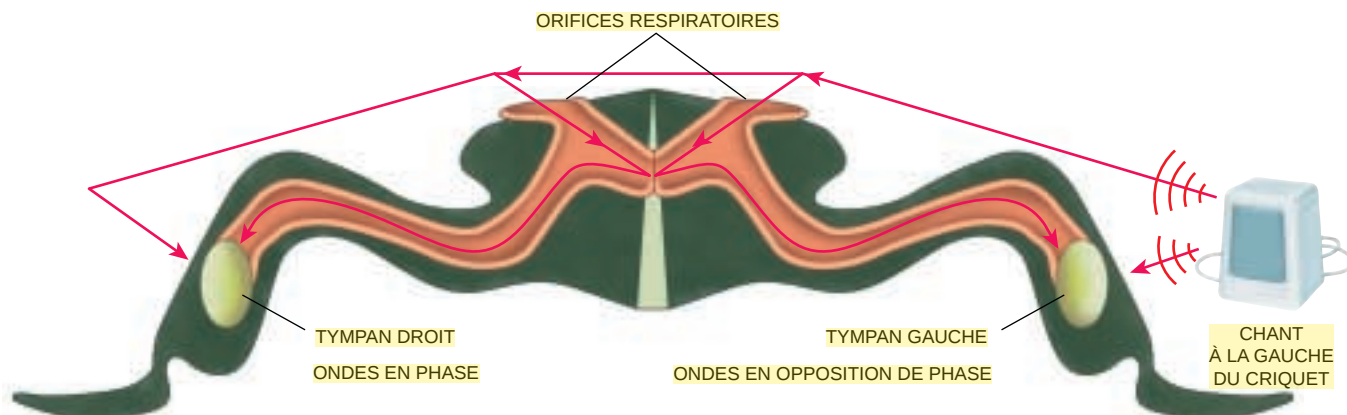
Lors des tests, nous plaçons le robot dans une enceinte avec un haut-parleur et nous enregistrons son trajet en direction de ce dernier. Quand un son

à la fréquence de deux kilohertz est rythmé en syllabes de 300 millisecondes, séparées de silences de même durée, le robot zigzague dans sa direction selon un chemin sinueux, semblable à ceux que décrivent de vrais grillons. La longueur de ce chemin est toujours inférieure au double de la distance entre le point de départ et la source du son, le robot les contourne.

Quand le rythme des syllabes est plus rapide (syllabes et silences de moins de 200 millisecondes), le programme du robot ne distingue plus les



Dessin : Laurie Grace. Photographie : Jeff Foott, Bruce Coleman Inc.



3. LE GRILLON CAPTE LES SONS par les oreilles situées sur les deux pattes antérieures. Les sons atteignent les tympanes par deux voies distinctes : directement par les oreilles et à travers le réseau tubulaire du système respiratoire, qui s'ouvre sur le corps de l'insecte et communique avec les oreilles. Sur le tympan le plus proche

de la source sonore, le son qui arrive par voie externe parcourt une distance plus courte que le son qui arrive par voie interne. Cette différence déphase les deux ondes sonores, qui s'additionnent et amplifient la vibration du tympan : le chant apparaît plus fort de ce côté.

silences. Il envoie alors peu de signaux de changement de direction aux moteurs : le robot parcourt des lignes droites autour de l'arène et ne trouve le haut-parleur que par hasard.

Des échecs bien imités

Quand le rythme des syllabes est plus lent (syllabes et silences de plus de 500 millisecondes), le robot trouve rarement le haut-parleur : les changements de direction sont plus rares, et le robot finit par suivre un chemin incurvé dans la direction générale du haut-parleur. De même, les vrais grillons prennent souvent un chemin courbe pour des

rythmes plus lents, et ils échouent davantage pour les rythmes plus rapides : non seulement le robot réussit comme les grillons, mais il échoue aussi comme eux.

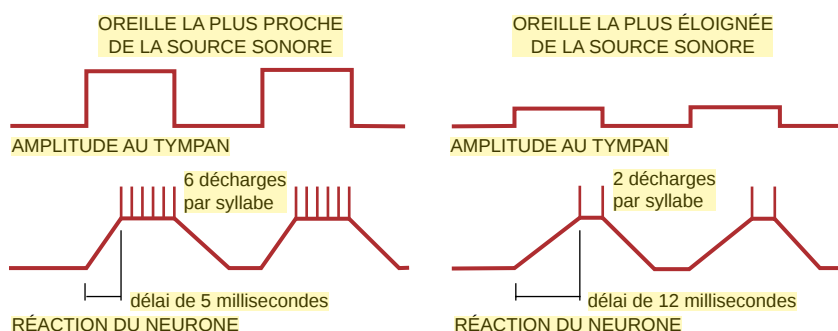
Dans la nature, le chant des grillons mâles est un motif, formé de trois à cinq syllabes séparées par des périodes de silence. Lorsque l'on fait entendre un tel chant au robot, le résultat est mitigé. Le robot se déplace sur une assez longue distance pendant les silences entre les motifs : il dépasse parfois le haut-parleur et met du temps à se réorienter. Toutefois, quand il parvient au haut-parleur, c'est plus rapidement qu'avec un chant monotone de syllabes

régulièrement espacées : il évalue la bonne direction pendant les motifs, puis il se déplace rapidement vers le haut-parleur pendant les périodes de silence sans perdre de temps en corrections supplémentaires.

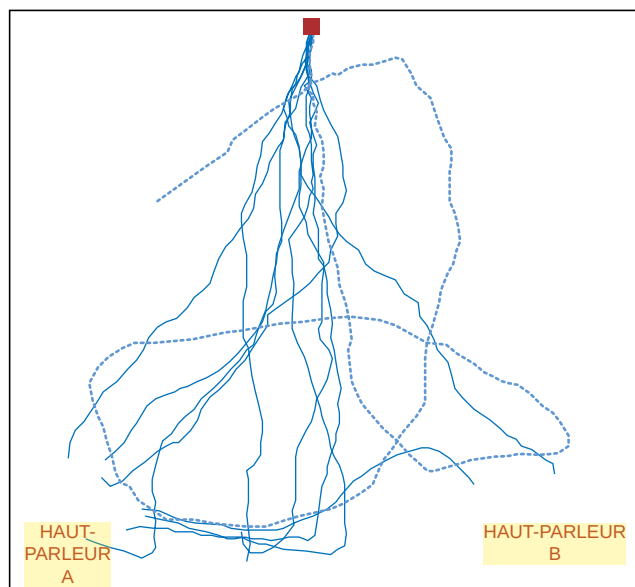
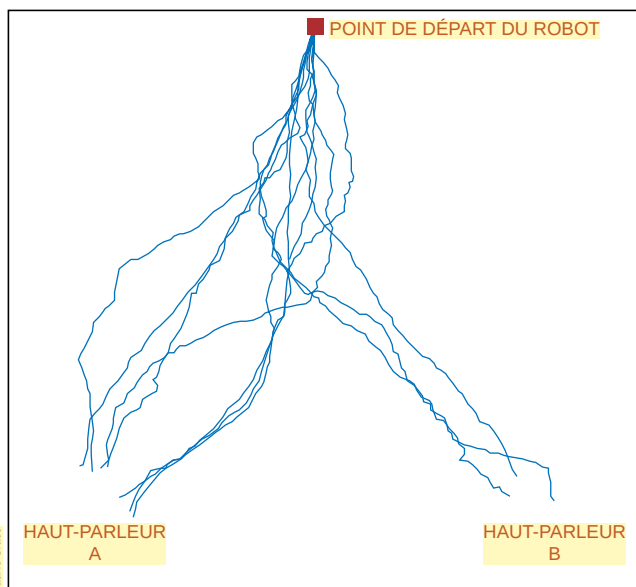
Pour les grillons aussi, le trajet est plus direct quand le chant est composé de motifs, mais un grillon que l'on empêche d'avancer tourne plus vers la direction du son lorsque les syllabes s'enchaînent sans interruption. Le comportement du robot laisse penser que la structure en motifs du chant est plus efficace pour attirer une femelle en raison de la structure de l'environnement, parsemé d'obstacles, plutôt que de mécanismes supplémentaires de traitement neuronal.

Comment le robot réagit-il quand il capte le son de plusieurs sources sonores ? Lorsque deux haut-parleurs émettent chacun un chant, le robot semble n'avoir aucun problème pour «faire son choix» et se diriger presque directement vers l'un ou vers l'autre.

Le programme du robot ne distingue naturellement pas entre les deux sons, mais les tests montrent que l'interaction des mécanismes simples du robot avec un champ sonore particulier produit un comportement proche de celui d'un véritable grillon. Autrement dit, il n'est pas nécessaire d'imaginer un processus complexe pour expliquer comment la femelle grillon sélectionne un partenaire. Malheu-



4. LA RÉACTION D'UN NEURONE INTERMÉDIAIRE auditif dépend de la direction de la source sonore. L'amplitude de la vibration du tympan (*en haut*) le plus proche de cette source (*à gauche*) est la plus grande. Chaque signal est la réaction à un son, nommé syllabe, émis par le grillon mâle. Le neurone intermédiaire relié au tympan le plus proche du son réagit à la vibration d'amplitude la plus grande par une augmentation rapide de la différence de potentiel électrique entre l'intérieur et l'extérieur du neurone ; celle-ci présente en outre six pics (*en bas, à gauche*). Pour le neurone relié au tympan le plus éloigné, la différence de potentiel augmente plus lentement et les pics sont moins nombreux (*en bas, à droite*).



5. LES TRAJETS DU ROBOT vers la source sonore sont quasi indiscernables de ceux suivis par un grillon. Quand des chants sont émis simultanément par les deux haut-parleurs, le robot se dirige simplement vers l'un ou vers l'autre (*à gauche*). De même, les grillons femelles se dirigent vers un seul mâle quand plusieurs chantent

simultanément. Quand les syllabes proviennent alternativement de chaque haut-parleur, les trajets du robot deviennent erratiques, le véhicule tournant souvent en rond entre les haut-parleurs (*à droite*). Dans une telle situation, les femelles réelles ont un comportement similaire.

reusement, dans ces expériences, nous ne contrôlons pas assez les caractéristiques des sons pour tester si le robot préfère certains chants à d'autres.

Lorsque le chant est partagé entre les deux haut-parleurs, en revanche, les syllabes provenant alternativement d'un côté puis de l'autre, le robot s'embrouille et se déplace entre les deux sources. Un grillon femelle confronté à ce scénario fait plus ou moins de même. Dans la nature, une telle situation ne dure pas : si deux mâles commencent à chanter en alternance, ils se synchronisent rapidement, parce que le chant de l'un stimule celui de l'autre.

Les similitudes entre les comportements du robot dans diverses situations et celui de véritables grillons ne prouvent pas que les mécanismes qui contrôlent la recherche du son chez ces derniers soient ceux que nous avons choisis pour nos expériences. Toutefois, elles permettent de proposer un modèle simple. Plus généralement, elles montrent qu'un comportement efficace et complexe peut résulter d'un mécanisme de contrôle simple, dès lors que celui-ci interagit de façon adéquate avec son environnement. Nous construisons aujourd'hui, avec le même mécanisme, un robot plus petit qui traite les sons plus rapidement ; nous le testerons avec des enregistrements de véritables chants de grillons pour voir si son comportement est encore plus proche de celui des grillons femelles.

Barbara WEBB est professeur de psychologie à l'Université de Nottingham.

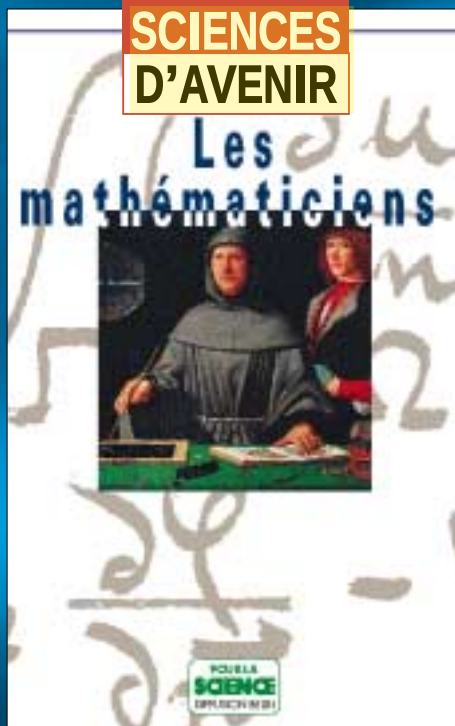
Franz HUBER et John THORSON, *La communication auditive chez le grillon*, in *Pour la Science*, février 1986.

T. WEBER et J. THORSON, *Auditory Behavior of the Cricket*, vol. 4 : *Interaction of Direction of Tracking with Perceived Temporal Pattern in Split-Song Paradigms*, in *Journal of Comparative Physiology A*, vol. 163, n° 1, pp. 13-22, janvier 1988.

Cricket Behavior and Neurobiology, sous la direction de F. Hubert, T.E. Moore et W. Loher, Comstock Publishing Associates, 1989.

A. MICHELSEN, A.V. POPOV et B. LEWIS, *Physics of Directional Hearing in the Cricket Gryllus bimaculatus*, in *Journal of Comparative Physiology A*, vol. 175, n° 2, pp. 153-162, février 1994.

Barbara WEBB, *Using Robots to Model Animals : A Cricket Test*, in *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 16, n° 2-4, pp. 117-132, 1995.



LES MATHÉMATICIENS

Pour comprendre le processus de la création mathématique, il faut saisir ce qui fait l'originalité d'un mathématicien. Cet ouvrage réunit les portraits de quinze grands mathématiciens. Leurs rapports avec leur époque, le regard qu'ils portent sur leur activité sont plus qu'anecdotiques : ils révèlent la genèse des idées nouvelles et mettent en lumière le caractère audacieux, dynamique et imaginaire de l'invention mathématique.

Voir bon de commande p. 98

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN