



4. LES TEMPÊTES DE SABLE dans le Sahara dispersent des particules de poussière sur tout le Globe : on retrouve parfois des poussières sahariennes jusque en Amazonie, à des distances supérieures à 5 000 kilomètres.

pour montrer que la brusque raréfaction des cations basiques est une cause importante de la dégénérescence des forêts : Ernst-Detlef Schulze et ses collègues de l'Université de Bayreuth pensent que l'appauvrissement des sols en magnésium contribue au dépérissement des forêts de résineux d'Allemagne, et, dans les Appalaches, les troubles de croissance des séquoias semblent également correspondre à une décalcification du sol. Par ailleurs, des expériences de fertilisation de sols forestiers par des apports de cations basiques ont amélioré l'état de forêts d'érables, au Québec, et de sapins, en France, en Norvège et en Allemagne. Ces expériences confirment que certains sols souffrent non seulement des pluies acides, mais aussi de la pénurie de cations basiques dans l'atmosphère.

Les chimistes savent aujourd'hui déterminer l'origine des cations basiques et suivre leurs déplacements dans les écosystèmes forestiers en mesurant l'abondance des isotopes naturels du strontium (ces isotopes se distinguent par des nombres de neutrons différents). Cet élément est un bon marqueur du calcium, car il se comporte chimiquement comme lui. Or la composition isotopique du strontium est différente, selon que le strontium provient de l'atmosphère ou du sous-sol. Par des dosages des isotopes du strontium, on a établi le rôle prépondérant de la poussière atmosphérique comme source importante d'ions pour les écosystèmes forestiers. En outre, ces dosages ont montré que, dans les régions où les sols ont été dégradés par

les pluies acides ou dans les sols naturellement pauvres en ions basiques, la majeure partie du calcium semble provenir de l'atmosphère plutôt que des roches. Ainsi le hêtre qui domine les forêts non polluées du Chili se nourrit presque exclusivement de calcium atmosphérique.

Ces observations montrent comment l'atmosphère contribue à l'alimentation des forêts et comment l'appauvrissement de l'atmosphère en cations basiques a ralenti la régénération des sols. Bien sûr, les concentrations naturelles en poussières n'ont jamais été constantes, dans l'atmosphère, mais, dans le passé, les variations s'étaient étalées sur des siècles ou sur des millénaires. Analysant des carottes de glace du Groenland, Paul Mayewski et ses collègues de l'Université du New Hampshire ont montré que le contenu en poussières de l'atmosphère a été fortement modifié par les variations climatiques au cours des 20 000 dernières années : lors des périodes arides et froides, les concentrations en ions calcium et en poussières étaient élevées ; lors des périodes humides et chaudes, elles étaient faibles. En outre, les concentrations actuelles sont inférieures à celles des 1 200 dernières années (il y eut toutefois une raréfaction considérable de la concentration en poussières au cours des années 1930, dans la région de l'Ouest des États-Unis).

Encore moins de soufre

En découvrant le rôle fondamental des composés basiques de l'atmosphère et, plus récemment, le lien étroit entre les émissions de poussières atmosphériques et les éléments nutritifs des sols, les agronomes ont mieux compris les réactions des forêts à la pollution. L'ensemble des études montre que les mécanismes d'action des pluies acides sont plus complexes que prévu et que les ravages causés par la pollution sont plus graves qu'on ne l'imaginait. Le gouvernement américain fondait ses récents programmes de lutte contre les pluies acides sur un audit de 1990, qui concluait que ces pluies n'avaient pas d'action prouvée sur les forêts ; cette conclusion n'est aujourd'hui plus tenable.

Le phénomène des pluies acides, ajouté à la raréfaction des éléments basiques, semble placer la plupart des espèces végétales, notamment dans les écosystèmes sensibles, dans des condi-

tions écologiques qu'elles n'ont jamais connues ; aussi la prévision de leur résistance et de leurs comportements au cours des prochaines décennies semble difficile. De surcroît, les effets de la pollution pourraient ne pas se limiter aux plantes : Jaap Graveland et ses collègues de l'Université de Groningue ont observé que, dans les forêts les plus gravement touchées par les pluies acides, où les concentrations en éléments basiques du sol sont les plus faibles, certains oiseaux, telles les mésanges de Hollande, produisent des œufs dont les coquilles sont plus minces et plus fragiles.

Comment résoudre ce problème des pluies acides et des poussières atmosphériques ? Les solutions les plus étonnantes ont été imaginées : après la publication d'un de nos récents articles, par exemple, un lecteur proposa des campagnes de lâchers de ballons qui, une fois en altitude, relargueraient des particules riches en calcium. C'est une solution poétique, mais coûteuse. Nous proposons plutôt de continuer à réduire les émissions de polluants acides à un niveau tel que ces derniers puissent être compensés par les constituants basiques naturels de l'atmosphère : autrement dit, il faudrait réduire les émissions de dioxyde de soufre et de dioxyde d'azote plus encore qu'on ne le fait aujourd'hui.

Lars HEDIN et Gene LIKENS sont respectivement professeurs d'écologie à l'Université Cornell et à l'Université de Millbrook.

Ecology and Decline of Red Spruce in the Eastern United States, sous la direction de C. Eagar et M.B. Adams, Springer-Verlag, 1992.

J. GRAVELAND, R. van der WAL, J.H. van BALEN et A.J. van NOORDWIJK, *Poor Reproduction in Forest Passerines from Decline in Snail Abundance of Acidified Soils*, in *Nature*, vol. 368, pp. 446-448, 31 mars 1994.

Lars O. HEDIN, Lennart GRANAT, Gene E. LIKENS, T. Adri BUSHAND, James N. GALLOWAY, Thomas J. BUTLER et Henning RHODE, *Steep Declines in Atmospheric Base Cations in Regions of Europe and North America*, in *Nature*, vol. 367, pp. 351-354, 27 janvier 1994.

Gene E. LIKENS, Charles T. DRISCOLL et Donald C. BUSO, *Long-Term Effects of Acid Rain : Response and Recovery of a Forest Ecosystem*, in *Science*, vol. 272, pp. 244-246, 12, avril 1996.

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.

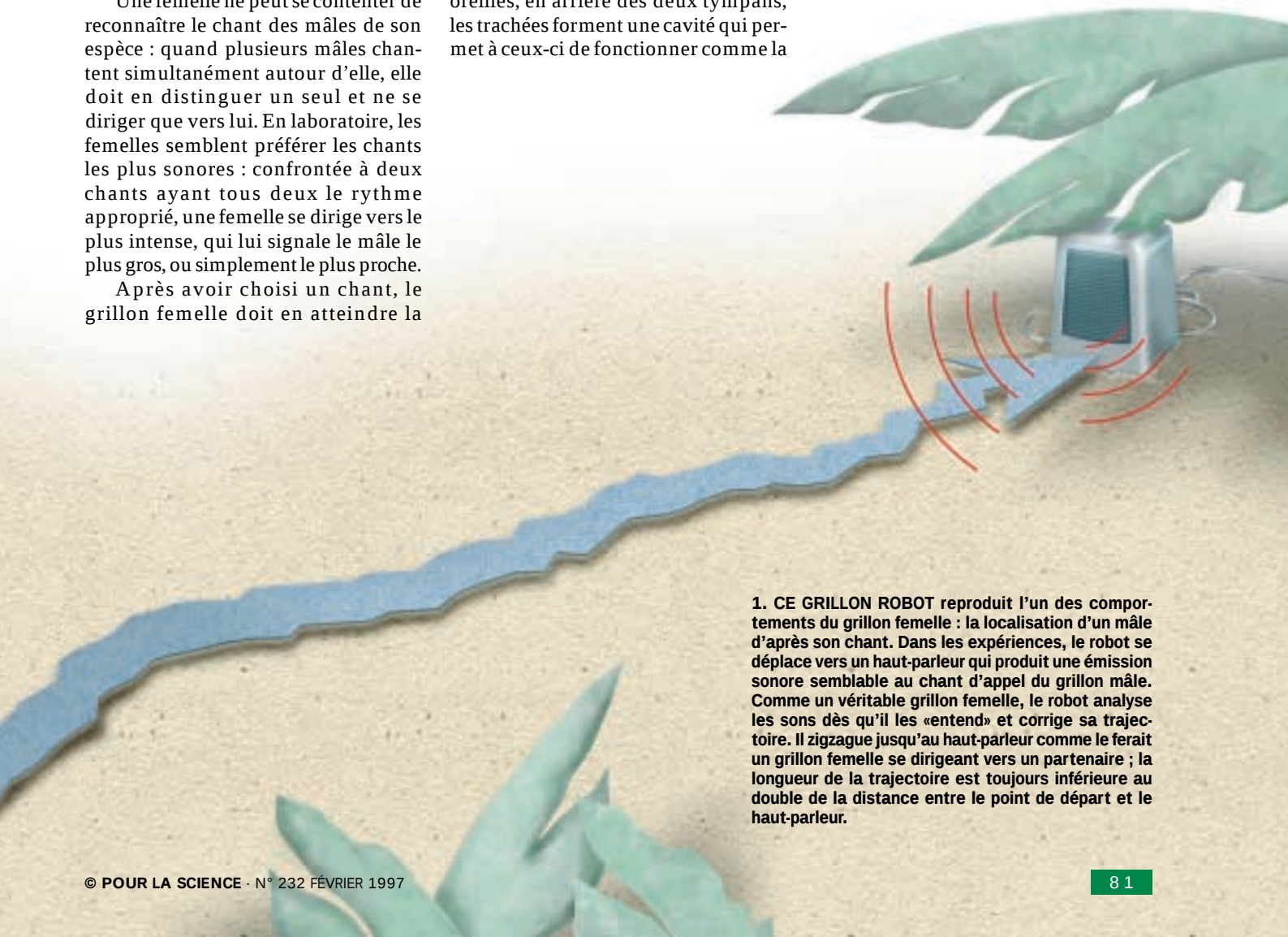
Comment le grillon entend-il? Ses oreilles sont placées sur ses pattes antérieures. Comme le corps du grillon absorbe peu les sons de basse fréquence, les deux oreilles reçoivent un son de même intensité, quelle que soit la direction d'où il provient. D'autre part, comme la longueur d'onde du chant est 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

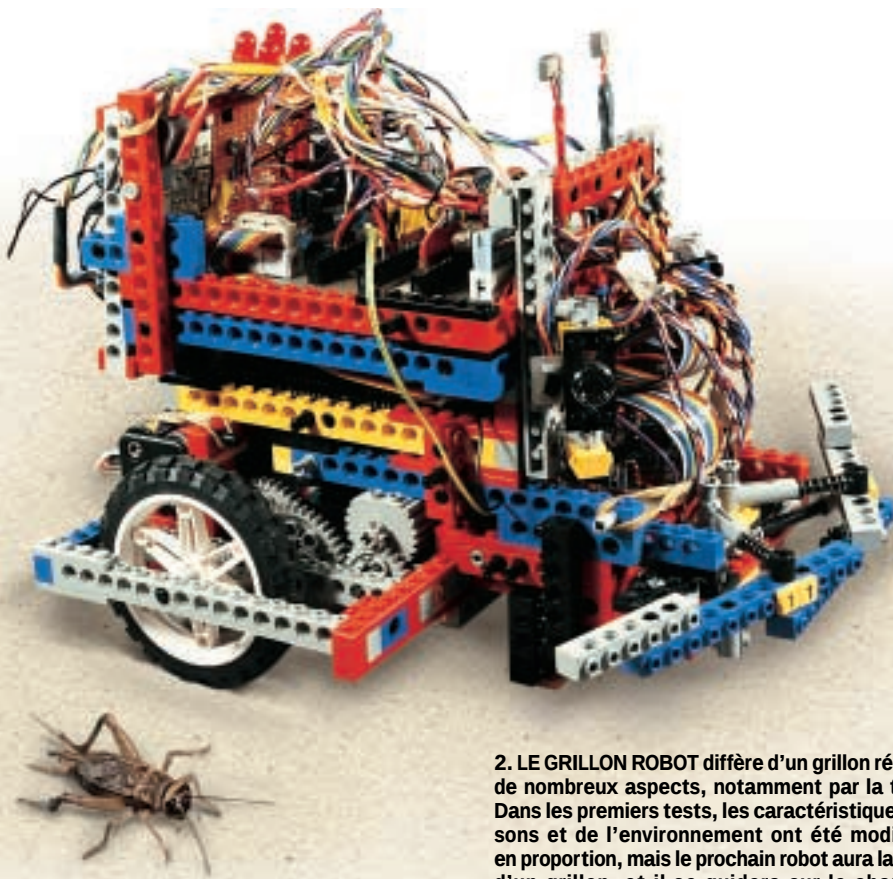
peau d'un tambour. Les deux ondes qui parviennent sur un tympan en suivant ces deux chemins parcourent des distances différentes : elles sont déphasées. Leurs interférences renforcent ou suppriment la vibration du tympan : l'amplitude de celle-ci est supérieure du côté le plus proche du son, ce qui indique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

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

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.

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.

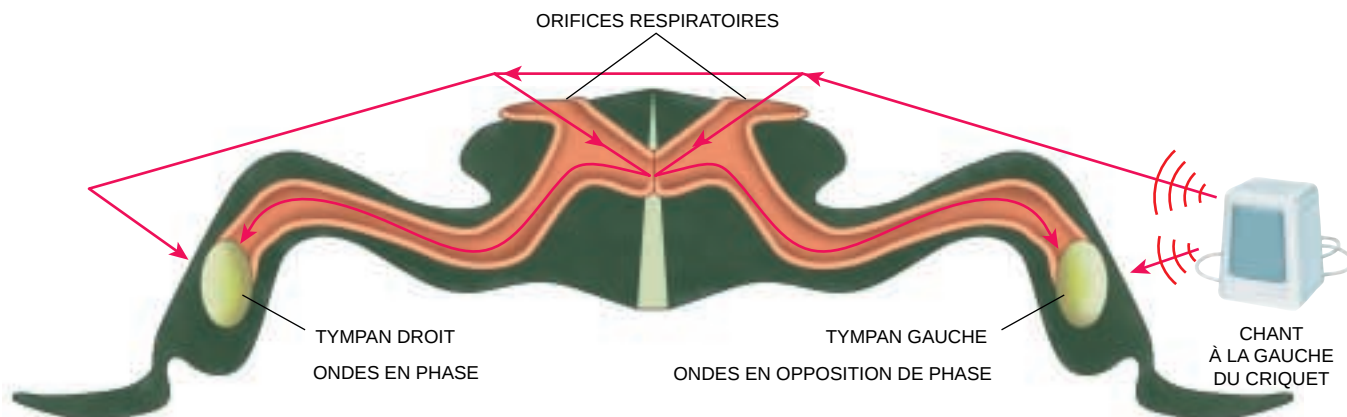
Lors des tests, nous plaçons le robot dans une enceinte avec un haut-parleur et nous enregistrons son trajet en direction de ce dernier. Quand un son

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 tympans 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.

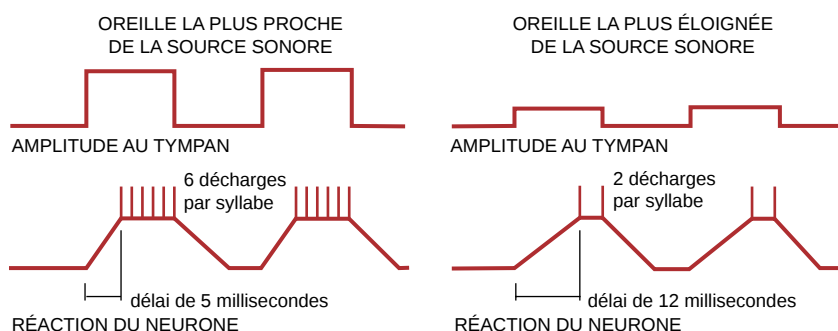
Dans la nature, le chant des grillons mâles est un motif, formé de trois à cinq syllabes séparées par des périodes de silence. Lorsque l'on fait entendre un tel chant au robot, le résultat est mitigé. Le robot se déplace sur une assez longue distance pendant les silences entre les motifs : il dépasse 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.

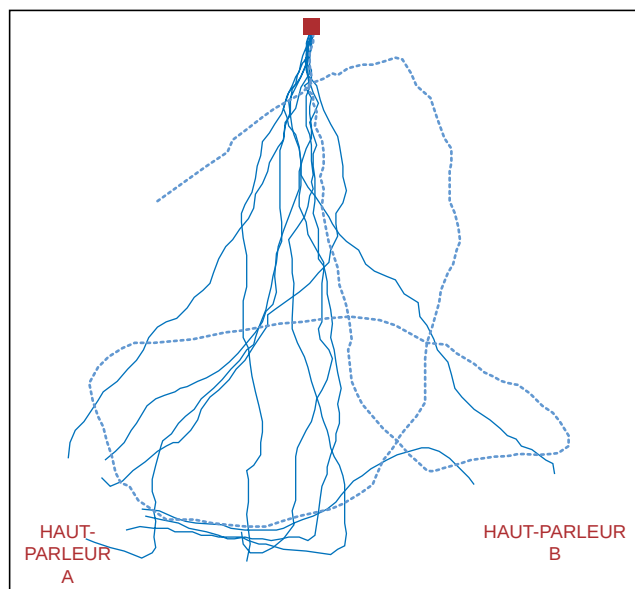
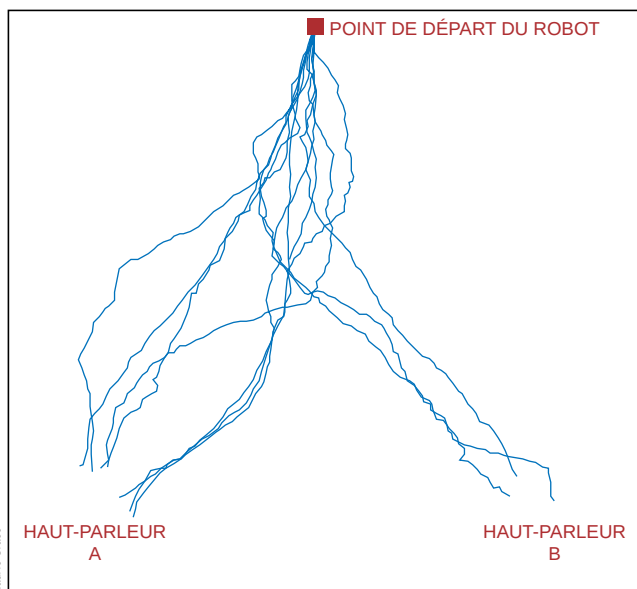
Pour les grillons aussi, le trajet est plus direct quand le chant est composé de motifs, mais un grillon que l'on empêche d'avancer tourne plus vers la direction du son lorsque les syllabes s'enchaînent sans interruption. Le comportement du robot laisse penser que la structure en motifs du chant est 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.

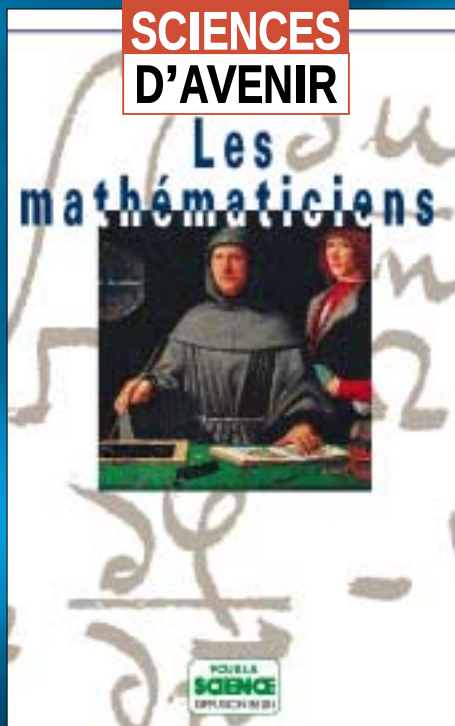
Franz HUBER et John THORSON, *La communication auditive chez le grillon*, in *Pour la Science*, février 1986.

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 imaginatif de l'invention mathématique.

Voir bon de commande p. 98

**POUR LA
SCIENCE**
DIFFUSION BELIN

La vie quotidienne dans l'Égypte ancienne

ANDREA MCDOWELL

Des ouvriers-artisans et leurs familles ont vécu, il y a 3 000 ans, dans le village nommé aujourd'hui Deir el-Medina. Des écrits provenant de cette communauté exceptionnellement instruite décrivent de nombreuses activités quotidiennes.

Durant le Nouvel Empire (1552-1085 avant notre ère), la ville de Thèbes, capitale de Haute-Égypte, devint l'un des plus grands centres urbains du monde antique. Les temples imposants de Karnak et de Louxor furent construits à cette époque ; ils dominent encore la rive droite du Nil dans la ville moderne de Louxor. La Vallée des Rois, toute

proche sur la rive gauche du Nil, contient une soixantaine de tombeaux, dont celui du pharaon Toutankhamon. Des centaines de tombes privées, parfois magnifiquement décorées, s'alignent également sur cette rive.

Bien que quelques-unes des peintures des monuments représentent la

vie fastueuse de la haute société, le reste des temples et des tombeaux nous renseigne davantage sur les préoccupations religieuses et les croyances en l'au-delà que sur les aspects de la

Photo : O. Louis Mazza/anta. National Geographic Image Collection. Dessin : Tono Narashima



1. DEIR EL-MEDINA (ci-dessus) est situé près des ruines de la ville de Thèbes. Il y a 3 000 ans, ce village était celui des tailleurs de pierre, des scribes et des peintres-décorateurs qui travaillaient à la nécropole de la Vallée des Rois. Ces ouvriers-artisans utilisaient des fragments de pierre nommés «ostraca» comme supports d'écriture peu coûteux pour les documents officiels ou privés, les lettres, les poèmes et les croquis. Des milliers d'ostraca ont été trouvés sur le site de ce village remarquablement préservé, reconstitué ci-contre.

