

Forts de ces premières expériences avec *Zophobas* et *Cotinis*, nous avons trouvé comment saisir les scarabées sans les blesser et où coller, avec de la cire d'abeille, les microfils sur leur dos, près des muscles des ailes et à la base de la tête. Nous avons conçu et construit sur mesure de minuscules circuits pouvant recevoir des instructions radio et appliquer les types de signaux électriques que nous expérimentions (voir l'encadré pages 54 et 55).

Actuellement, le système de base comprend les composants suivants : un microcontrôleur avec une radio intégrée (pour la réception des instructions), une batterie (qui applique des impulsions électriques) et plusieurs fils en argent très fins (de 125 micromètres de diamètre), implantés dans le cerveau et dans les muscles intervenant dans le vol.

Les cétoines *Cotinis texana* ne pouvant transporter que 200 à 450 milligrammes au plus, le système initial n'était pas équipé de radio. Pour tester le contrôle, nous chargions au préalable des commandes de vol dans le microcontrôleur, puis observions le coléoptère effectuant soit un vol libre, soit attaché à un fil ou suspendu dans un cardan (en attachant le scarabée à un cardan, on peut l'observer voler en restant sur place).

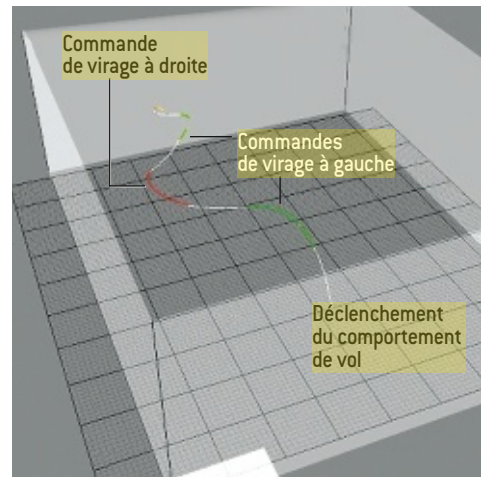
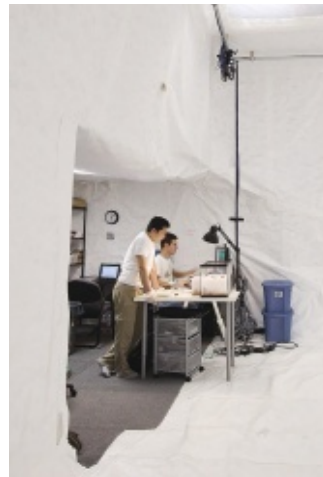
Il nous a fallu deux mois pour obtenir notre premier succès avec *Cotinis*. Au bout de plusieurs expériences, nous avons trouvé une zone de neurones relativement étendue qui, après stimulation électrique, permettait de produire des modulations de vol reproductibles et prévisibles.

Si notre schéma de stimulation avait dépendu de l'excitation d'un seul neurone, par exemple, il aurait probablement été difficile de reproduire le résultat chez un grand nombre d'insectes. En vol, le moindre déplacement du point d'attache de l'implant aurait rendu les insectes incontrôlables. En outre, de par les variations anatomiques entre individus, la recherche des neurones cibles isolés aurait été très fastidieuse et la production en grand nombre de cyberinsectes quasi impossible.

Quoi qu'il en soit, nous avons déterminé que la stimulation d'une région du cerveau de l'insecte, située juste entre les lobes optiques gauche et droit, par des impulsions électriques rapides (d'une durée de 10 millisecondes environ, soit une fréquence de 100 hertz), fait battre des ailes l'insecte et lui fait adopter une posture correcte de vol dans 97 pour cent des cas. Tout aussi intéressant, une impulsion

LA TRAJECTOIRE D'UN CYBERSCARABÉE

Les chercheurs du laboratoire de M. Maharbiz mettent à l'épreuve leurs coléoptères-robots dans une pièce spécialement équipée (ci-dessous, avec H. Sato debout). La trajectoire de vol figurée à droite a démarré (ligne blanche en bas à droite) en stimulant les lobes optiques du scarabée, ce qui déclenche un comportement de vol. Les impulsions électriques appliquées au muscle basilaire droit (ou gauche) font tourner l'insecte à gauche (ou à droite). Le vol s'est interrompu (en haut à gauche) lorsque les lobes optiques ont reçu une impulsion plus longue que la première.



plus longue appliquée dans la même région stoppait totalement le battement d'ailes. En d'autres termes, nous pouvions mettre l'insecte en marche et l'arrêter en appliquant une impulsion pour démarrer le mouvement de ses ailes et une autre impulsion, plus longue, pour l'interrompre.

Comme avec un bouton marche/arrêt...

Il nous semble que cette impulsion plus longue surcharge les neurones à la base du lobe optique et les empêche ainsi de propager des influx nerveux. Cela perturbe le signal de déclenchement qui maintient l'oscillation des ailes.

Nos impulsions électriques étaient efficaces même si on les répétait, quelle que soit l'activité de l'insecte au moment où on les appliquait. Si le scarabée était en train de marcher sur une table, ses ailes se mettaient à battre et il s'envolait quand on lui envoyait des impulsions électriques de dix millisecondes. Quand nous le posions sur le dos, pattes en l'air sur la table, et qu'une impulsion était appliquée, il battait des ailes en position renversée. S'il était déjà en train de voler et que nous lui appliquions une impulsion supplémentaire, ses ailes s'arrêtaient et il tombait, puis il continuait en rampant.

Rien n'indiquait que nous causions des dommages aux insectes, même en cas de chute. Les scarabées équipés d'implants vivaient aussi longtemps que les scarabées qui en sont dépourvus (quelques mois). Ils volaient, se nourrissaient et se reproduisaient comme les scarabées normaux.

Nous avons aussi constaté qu'en appliquant des signaux marche/arrêt de façon répétée et très rapprochée pendant que l'insecte volait, nous pouvions moduler les oscillations des ailes. En d'autres termes, une fois l'insecte en vol, l'envoi de commandes rapides marche/arrêt les unes après les autres n'arrêtait pas les oscillations des ailes, mais les ralentissait un peu. Cela modifiait la poussée des insectes et nous permettait de contrôler de façon fiable la puissance déployée par les scarabées pour voler, un peu comme les pilotes d'avions utilisent la commande des gaz pour contrôler leur appareil.

Pour faire prendre un virage aux scarabées, nous avons implanté des microfils sur les muscles gauche et droit de la base des ailes (muscles basilaires). En appliquant des impulsions de dix millisecondes au muscle de droite, l'insecte développait davantage de puissance du côté droit, ce qui le faisait virer à gauche.

Plus tard, nous avons commencé à utiliser de grandes cétoines africaines,

Svetoslav Kolev et Nimbus Gortausen, University of California, Berkeley

LES AUTEURS



Michel MAHARBIZ est professeur de génie électrique et d'informatique à l'Université de Californie à Berkeley (États-Unis). Hirotaka SATO travaille dans son laboratoire.

de l'espèce *Mecynorrhina torquata* : pesant huit grammes, elles conviennent bien pour porter à la fois la radio et les charges que nous avons développées.

Aussi spectaculaires que puissent être certains de ces résultats, les efforts sont à poursuivre. Certes, nous avons montré que nous pouvons faire tourner un scarabée à gauche et à droite et lui faire parcourir des trajectoires à peu près circulaires. Mais l'objectif à terme est de guider le vol d'un scarabée suivant des schémas complexes en trois dimensions, de façon que l'insecte puisse contourner des obstacles, par exemple descendre le long des cheminées et remonter des tuyaux.

Pour ce faire, nous avons ajouté à la charge transportée de minuscules microphones, qui enregistrent les battements d'ailes de l'insecte en vol. Quand le son atteint un niveau donné, indiquant généralement quand l'aile est en position haute

enregistrements à haute fréquence de scarabées en vol. Il s'agit de cartographier la configuration tridimensionnelle et la fonction de certains autres muscles qui gouvernent l'orientation des ailes. À partir de ces données, nous visons maintenant différents muscles susceptibles de nous permettre de contrôler les mouvements de roulis et de tangage de façon plus indépendante.

Devons-nous fabriquer des scarabées-robots ?

La question de savoir si des insectes télécommandés seront utiles comme robots ou non est ouverte, mais nous pressentons que tel sera le cas. Des radios et des microcontrôleurs plus petits et de faible puissance continueront à apparaître sur le marché et nous permettront de contrôler mieux et plus finement nos cyber-scarabées. Tant qu'il sera difficile de développer de petites sources d'alimentation artificielles ou de construire des ailes mécaniques très économes en énergie, nos scarabées et leurs muscles super-efficaces auront un net avantage sur des objets volants entièrement fabriqués par l'homme.

Parmi toutes les applications que pourraient avoir nos travaux, nous pensons que la plus essentielle est la suivante : à mesure que la technologie informatique se miniaturise et que la connaissance des systèmes biologiques progresse, nous serons de plus en plus tentés d'introduire des interfaces et des boucles de contrôle dans des systèmes biologiques existants. La mise au point des détails en commençant par des insectes nous évitera de commettre des erreurs en procédant sur des organismes supérieurs tels que le rat ou la souris, voire l'homme. Cela nous permet aussi de repousser à plus tard de nombreux problèmes éthiques plus profonds, qui concernent notamment le libre arbitre, problèmes qui deviendraient plus pressants si ces travaux étaient réalisés chez des vertébrés.

Le développement de cyberinsectes ne remplacera pas la démarche fondamentale qui consiste à concevoir et construire des robots entièrement artificiels. Toutefois, ce type de travaux relève d'une démarche plus générale consistant à relier des tissus vivants à des dispositifs artificiels, que ce soit dans un contexte biologique, médical ou robotique. Et cette approche visant à atteindre une fusion parfaite entre éléments biologiques et éléments synthétiques n'en est qu'à ses débuts. ■

LA DÉMARCHE VISANT À ATTEINDRE

une fusion parfaite entre éléments biologiques et éléments fabriqués par l'homme n'en est qu'à ses débuts.

ou basse du battement, nous pouvons appliquer des impulsions de stimulation précises aux muscles directeurs du scarabée, pour les contrôler plus finement.

À ce stade, le matériel fonctionne très bien, mais nous avons besoin d'aide pour les programmes informatiques qui contrôlent nos coléoptères. Nous avons fait appel à certains de nos collègues ayant plus d'expérience sur les logiciels d'objets volants entièrement fabriqués. En s'appuyant sur ses travaux relatifs à des hélicoptères autonomes, Pieter Abbeel, de l'Université de Californie à Berkeley, avec ses étudiants Svetoslav Kolev et Nimbus Goehausen, développe un système de contrôle pour insectes, qui décompose les commandes complexes (telles que « changer le cap de 20 degrés ») en leurs éléments constitutifs (comme « appliquer des impulsions de dix millisecondes au muscle basilaire droit pendant tant de secondes »). Un utilisateur n'aura alors plus qu'à entrer certaines corrections de route et le microcontrôleur prendra en charge les stimulus nécessaires pour faire voler l'insecte dans cette direction.

Pour déterminer quelle doit être cette série de stimulus, nous faisons appel à l'imagerie par résonance magnétique, à des examens anatomiques approfondis et à des

✓ BIBLIOGRAPHIE

H. Sato *et al.*, Remote radio control of insect flight, *Frontiers in Integrative Neuroscience*, vol. 3, article 24, 5 octobre 2009.

N. Ando *et al.*, A dual-channel FM transmitter for acquisition of flight muscle activities from the freely flying hawkmoth, *Agrius convolvuli*, *Journal of Neuroscience Methods*, vol. 115[2], pp. 181-187, 2002.

M. H. Dickinson *et al.*, Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight, *Science*, vol. 284, pp. 1954-1960, 1999.

H. Fischer *et al.*, A radiotelemetric 2-channel unit for transmission of muscle potentials during free flight of the desert locust, *Schistocerca gregaria*, *Journal of Neuroscience Methods*, vol. 64[1], pp. 39-45, 1996.