

✓ SUR LE WEB

Vidéos disponibles en ligne
aux adresses :

[www.eecs.berkeley.edu/
~maharbiz/cyborg.html](http://www.eecs.berkeley.edu/~maharbiz/cyborg.html)

[www.frontiersin.org/
interactive_neuroscience/
10.3389/neuro.07/024.2009/
abstract](http://www.frontiersin.org/interactive_neuroscience/10.3389/neuro.07/024.2009/abstract)

[www.ScientificAmerican.com/
dec2010/cyborg_video](http://www.ScientificAmerican.com/dec2010/cyborg_video)

avait beaucoup d'importance. Par exemple, si l'on éteignait brusquement la lumière dans une pièce, nos coléoptères s'arrêtaient de voler sur-le-champ ; cela signifie que les insectes ont besoin de recevoir des données visuelles pour continuer à battre des ailes.

Nous en avons déduit que la stimulation des lobes optiques ou des régions situées à leur base pourrait déclencher de fortes réponses locomotrices. Comme l'implantation d'un dispositif de stimulation directement dans l'œil ou le lobe optique lui-même affecterait la capacité de manœuvrer de l'insecte, nous nous sommes concentrés sur les régions situées à la base des lobes. Il n'était pas nécessaire de stimuler des neurones uniques. En appliquant juste une impulsion électrique appropriée à proximité de la base des lobes optiques, les propres circuits neuronaux du coléoptère se chargeaient du reste et l'insecte s'envolait.

Il y a eu de nombreux faux départs avant notre premier vol réussi. Initialement, nous avons travaillé pendant six mois avec des *Zophobas morio* (longs de 1,5 centimètre et pesant un gramme), coléoptères dont la larve est communément nommée ver de

farine géant. Ces insectes se trouvent en animalerie, leurs larves étant utilisées comme nourriture pour les geckos et autres petits reptiles de compagnie.

Malheureusement, nous n'avons jamais pu les faire voler. Nous les avons lancés en l'air des centaines de fois, ils refusaient d'ouvrir leurs ailes. Apparemment, *Zophobas* n'aime tout simplement pas beaucoup voler. C'était un échec, mais en tout cas nous avons beaucoup appris sur l'anatomie des insectes grâce à *Zophobas*.

Des tâtonnements

Finalement, nous sommes passés à la cétoine verte du pêcher (*Cotinis texana*), un scarabée répandu dans le Sud-Est des États-Unis qui mesure 2 centimètres et pèse entre 1 et 1,5 gramme. *Cotinis texana* est un insecte volant bien connu, sans parler du fait que c'est un nuisible pour les producteurs de fruits. Pendant plusieurs années, nous en avons collecté des milliers chez les producteurs, qui avaient du mal à croire que nous leur offrions cinq dollars par scarabée pour les en débarrasser.

Et tout s'éclaire

france culture

La marche des sciences
14h/15h jeudi

avec Aurélie Luneau
en partenariat avec le magazine Pour la Science

franceculture.com

DREAM ON - Radio France / Christophe Abramowitz

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).

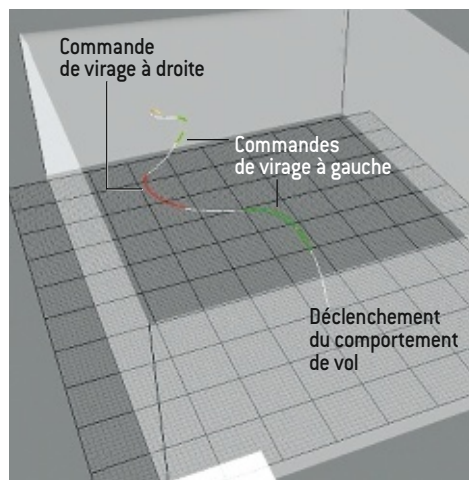
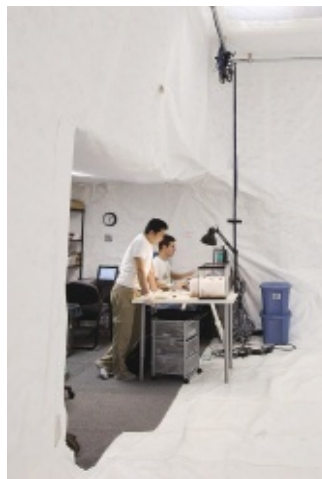
Il nous a fallu deux mois pour obtenir notre premier succès avec *Cotinis*. Au bout de plusieurs expériences, nous avons trouvé une zone de neurones relativement étendue qui, après stimulation électrique, permettait de produire des modulations de vol reproductibles et prévisibles.

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.



Svetoslav Kolev et Nimbus Gortausen, University of California, Berkeley

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,