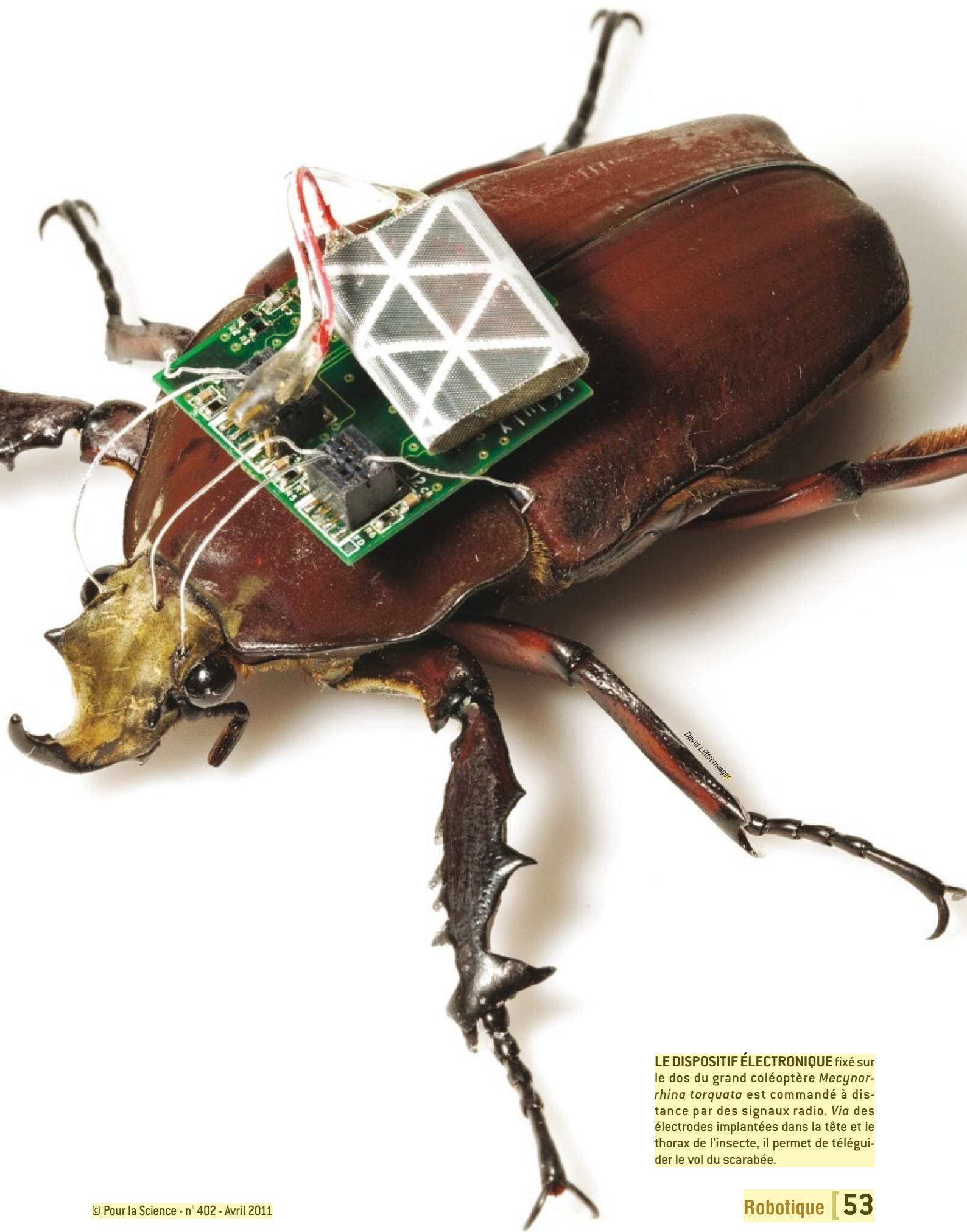




LE DISPOSITIF ÉLECTRONIQUE fixé sur le dos du grand coléoptère *Mecynorrhina torquata* est commandé à distance par des signaux radio. Via des électrodes implantées dans la tête et le thorax de l'insecte, il permet de téléguider le vol du scarabée.

fabriqués par l'homme, qui interviennent si nécessaire dans le vol des insectes.

En d'autres termes, l'insecte vole de lui-même, mais des circuits implantés dans son système nerveux lui ordonnent de tourner à gauche ou à droite, de monter ou descendre, etc., ces commandes étant transmises par des manipulateurs humains à distance. En fait, nous avons construit des cyberinsectes volants, mi-insectes, mi-machines.

L'idée nous en est venue il y a cinq ans, quand l'un de nous (M. Mahabiz) a participé à un atelier sur les cyberinsectes, organisé par la DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*, l'agence de recherche militaire américaine). Les participants à l'atelier ont passé en revue certaines techniques permettant aux biologistes de recevoir et d'enregistrer des signaux électriques émis par des muscles d'insectes en vol libre.

Amit Lal, directeur des programmes de la DARPA, a jugé que c'était le bon moment pour tirer avantage de ces avancées en déterminant si l'on pouvait aussi transmettre des signaux électriques à ces muscles à l'aide de microcircuits implantés, qui les feraient bouger comme on le souhaiterait.

Les cyberinsectes ont potentiellement de nombreuses applications militaires ; l'une des plus importantes serait la possibilité de se renseigner sur les occupants d'un bâtiment ou d'une cave afin de décider du type d'intervention. Des hybridations entre circuits électroniques et circuits cérébraux auraient aussi beaucoup d'utilité dans le domaine civil, par exemple avec des insectes-robots capables de retrouver des survivants dans les décombres d'un tremblement de terre.

Avant 2005, les meilleures études décrivant le vol des insectes ont été réalisées

sur les criquets, les papillons de nuit et les mouches. Comment pouvions-nous nous appuyer sur ces travaux ? Les criquets et les papillons de nuit sont grands, mais ils ne peuvent pas porter beaucoup de poids. Restaient les mouches.

Mouches, scarabées, libellules : que choisir ?

Les mouches présentent de nombreux avantages. Tout d'abord, les biologistes en ont une bonne connaissance. Michael Dickinson, de l'Institut de technologie de Californie, et d'autres chercheurs ont déterminé de façon très détaillée quels muscles se contractent et à quels moments lorsque la mouche s'élève ou effectue un virage. En outre, les mouches utilisent l'énergie avec beaucoup d'efficacité, ce qui leur permet de battre des ailes et chan-

PLAN DE VOL TÉLÉCOMMANDÉ

Les auteurs utilisent des impulsions électriques bien réglées temporellement pour stimuler des régions relativement étendues de la circuiterie neuromusculaire des insectes et, ainsi,

diriger le vol de ces derniers. Ces impulsions électriques sont fournies par un dispositif électronique fixé sur l'insecte, dispositif qui est télécommandé à l'aide d'ondes radio.

Six électrodes de stimulation sont implantées dans le scarabée à proximité des lobes optiques gauche et droit, dans le cerveau, sur le thorax (électrode de référence), ainsi que dans les muscles basiliaires de vol, gauche et droit.

TÉLÉCOMMANDE DE VOL SANS FIL

Les chercheurs ont développé un système permettant de transmettre des commandes à des coléoptères volant librement, de façon similaire à des aéromodélistes qui télécommandent des avions ou hélicoptères miniaturisés.

Le montage de circuits imprimés (la batterie, de couleur argentée, est sur le dessus) achemine des impulsions électriques aux sites appropriés afin de démarrer le vol du coléoptère ou le stopper, de faire tourner l'insecte à droite ou à gauche, ou d'augmenter ou diminuer la puissance du vol.

L'antenne : un récepteur capte les commandes de vol et les transmet au dispositif électronique fixé sur le dos de l'insecte.

Mecynorrhina torquata

1,6 cm

Taille réelle

ger de direction à une vitesse étonnante. Toutefois, du point de vue technique, il est difficile de travailler avec ces insectes. Les mouches sont si petites que pour leur implanter des câblages et des circuits, il faut pratiquer de la nanochirurgie.

Quant aux libellules, elles volent bien et sont de taille suffisante, mais elles sont très fragiles. Les blattes étaient d'autres insectes envisageables...

La consultation d'un manuel de biologie des coléoptères, écrit par Roy Albert Crowson en 1981, nous a révélé que le vol des scarabées est très semblable à celui des mouches. Les muscles du thorax d'un coléoptère déforment sa carapace de telle façon que les ailes oscillent comme un diaphragme. Les types de muscles et leurs positions sur l'insecte paraissent également similaires à ceux des mouches. Le point peut-être le plus important est que les

coléoptères sont des insectes assez grands – entre un millimètre et plus de dix centimètres – et qu'ils ont une carapace lisse, sur laquelle il est facile de coller des éléments. De plus, on connaît plus de 350 000 espèces de coléoptères. En théorie, l'accès à de tels insectes devait être aisé. Mais il y avait trop peu d'éleveurs de coléoptères aux États-Unis pour couvrir nos besoins. Finalement, il a fallu des années avant que le laboratoire arrive à se fournir régulièrement en coléoptères, qu'il importe désormais d'éleveurs européens et asiatiques.

Notre objectif était de réussir à inciter à distance un insecte à voler, contrôler ses changements de direction et sa vitesse en cas de besoin, puis l'arrêter une fois atteint le lieu visé. En tant qu'ingénieurs, nous voulions que ces fonctions soient reproductibles et fiables, avec peu ou pas de dommages causés à l'insecte.

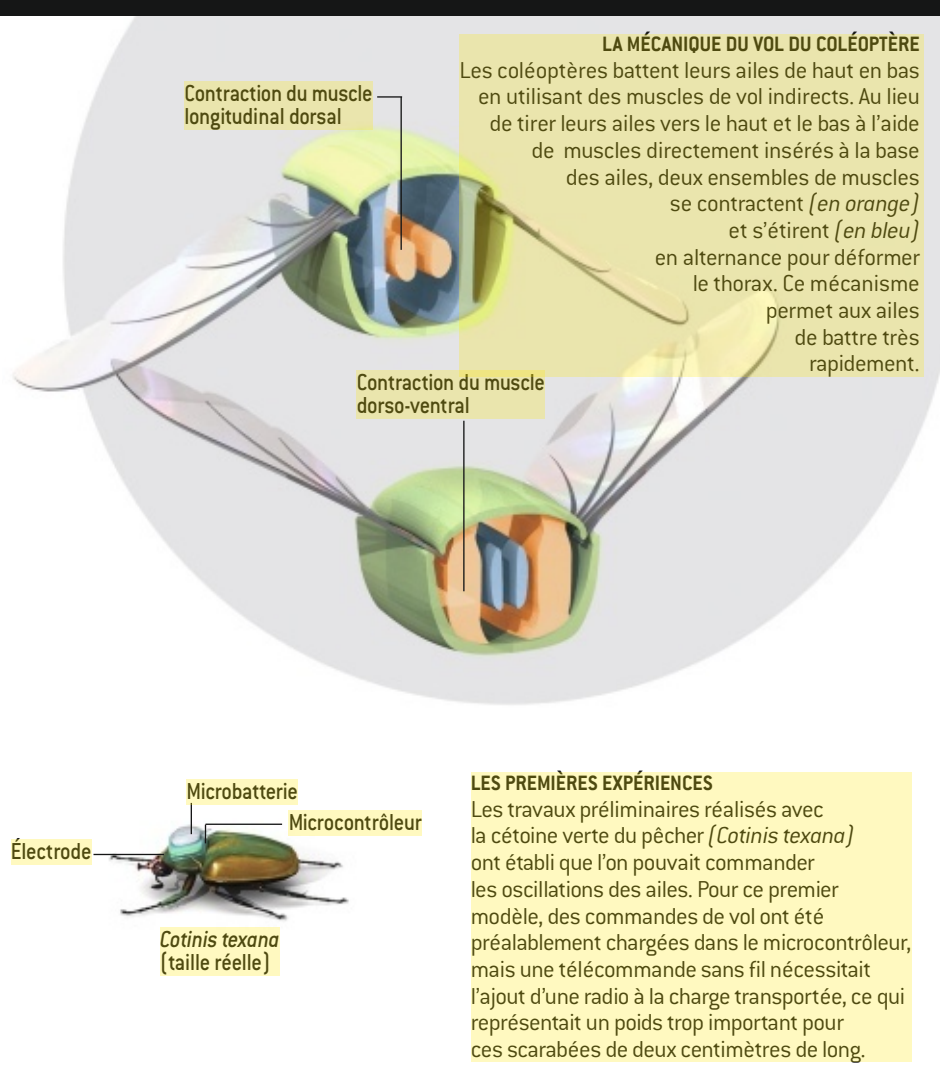
Il a d'abord fallu décider d'un ensemble minimal de comportements à contrôler. Nous ne voulions pas attacher les insectes à un fil pour régir leur comportement, comme d'autres l'ont fait; les attaches auraient été longues et se seraient enchevêtrées. Nous avons opté pour une télécommande radio, comme celle des aéro-modélistes qui commandent à distance de petits avions ou hélicoptères. Nous voulions faire démarrer et stopper à la demande les battements des ailes, augmenter ou diminuer l'ascension de l'insecte en vol et le faire virer vers la gauche ou la droite. Nous ne voulions pas contrôler tous les aspects du vol de l'insecte, les coléoptères ayant déjà une bonne capacité à stabiliser leur vol en se calant sur l'horizon et à régler leur vitesse et leurs trajectoires en fonction du vent et des obstacles.

Stimuler les circuits neuromusculaires

En même temps, nous voulions nous assurer que nous pourrions envoyer des signaux directement dans les circuits neuromusculaires de l'insecte, de sorte que même s'il tentait de faire autre chose, nous pourrions envoyer une contre-commande. Tout insecte qui ignorerait nos commandes ferait un mauvais robot.

La plupart des coléoptères sur lesquels nous avons choisi de travailler peuvent transporter entre 20 et 30 pour cent de leur poids. C'est donc la taille de l'insecte qui détermine la taille maximale de notre équipement de commande. Comme nous savions quels sont les muscles de l'insecte qui font osciller ses ailes, il paraissait raisonnable de supposer que l'envoi de décharges électriques de différentes fréquences aux muscles d'un côté ou de l'autre du corps nous permettrait de modifier la trajectoire de l'insecte, en modulant son battement d'ailes.

Nous savions aussi que ces insectes utilisent largement des repères visuels durant le vol. Tout comme chez les humains, la lumière pénétrant dans les yeux des insectes stimule des neurones sensibles à la lumière. Les signaux engendrés par ces neurones passent par les lobes optiques (structures nerveuses directement liées aux yeux) et arrivent au cerveau et aux ganglions, qui les traitent et fournissent à l'insecte des informations visuelles pendant son déplacement. Nous savions aussi que la quantité de lumière



✓ 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 cétoutine 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