

démonstrations scientifiques convaincantes; elles soulèvent d'importants problèmes éthiques et n'obtiennent, quand c'est le cas, que de faibles modifications comportementales. De plus, on ignore leurs effets à long terme et leurs éventuels effets négatifs sur l'apprentissage spontané de l'enfant. Enfin, les acquis obtenus ne tiennent pas compte du fait que les enfants autistes d'intelligence normale, le groupe pour lequel ces méthodes sont les plus efficaces, progressent souvent d'eux-mêmes, quel que soit leur environnement.

Alors que fait-on avec un enfant, puis un adulte autiste ? On ne le « soigne » pas, on l'élève et l'éduque, on le scolarise, en rendant son environnement suffisamment prédictible et compréhensible, et en le préservant des dangers extérieurs. Enfant, on met à sa disposition du matériel permettant d'exercer son intelligence, sa volonté d'explorer le monde et d'interagir avec autrui. À l'âge adulte, on l'aide à trouver un emploi et à être autonome.

Toutefois, on doit accepter que sa façon de jouer, les matériaux qui suscitent son intérêt et le rôle des parents sont très différents d'un autre enfant. Les informations qui l'intéressent ne sont pas enfantines,

centrées sur les personnages, le faire semblant, la variété, les joies partagées avec des pairs; elles sont techniques, centrées sur les fonctionnements des objets, la réalité physique, explorée dimension par dimension. On est aussi tolérant devant des manifestations de joie sous forme de mouvements répétitifs, ou de frustration sous forme de mouvements d'automutilation, le plus souvent bénins. On doit accepter que le langage oral soit en apparence exclu de ses interactions au début de la vie, et parfois pour toute la vie, ce qui n'empêche pas l'enfant autiste d'observer et de comprendre beaucoup de choses. Et il comprend souvent le langage écrit. En outre, son intérêt pour les autres enfants et l'intérêt des autres enfants pour lui n'occupent pas une place prépondérante dans son éducation.

Aider les enfants et les parents

Pour aider les parents dans ce parcours, il existe depuis peu des méthodes d'intervention plus légères que l'intervention comportementale intensive; elles s'appliquent souvent en milieu familial, ou lors de courtes séances où famille et enfant sont observés et aidés. Celles-ci bénéfi-

cient aujourd'hui d'une crédibilité scientifique supérieure à la thérapie comportementale intensive, du fait de larges essais cliniques. Elles visent à redonner aux parents les moyens de communiquer avec leur enfant, au lieu de juger ces derniers comme déviants par rapport à une norme communicative ou développementale.

Un enfant autiste devrait être scolarisé dans le système régulier. Plusieurs niveaux d'adaptation sont possibles, depuis la classe spéciale dans le système régulier jusqu'à l'aide individuelle. La fonction de l'aide sera d'individualiser les consignes et les évaluations académiques selon le niveau intellectuel et la compréhension des consignes, et d'aménager la façon de les transmettre. Dans les cas les plus extrêmes, un enfant autiste peut n'être accessible qu'à une seule tâche, directement inspirée de ses intérêts particuliers au moment de son entrée dans la classe; il s'agit ensuite d'élargir et de diversifier ses intérêts. Toutefois, la majorité des enfants autistes s'intéressent à l'acquisition des connaissances, et s'adaptent bien dans un cadre scolaire.

Alors que traite-t-on avec les médicaments ? L'autisme s'accompagne parfois, surtout à l'âge adulte

et dans les formes les plus verbales, d'anxiété, d'irascibilité et de dépression, qui peuvent bénéficier de traitements pharmacologiques. Et ces derniers ne changent pas les symptômes sociocommunicatifs de l'autisme. L'approche cognitivo-comportementale chez l'adulte qui parle consiste à travailler des attitudes bénéfiques et adaptatives, et à en supprimer d'autres qui lui nuisent ou nuisent à son entourage. Enfin, chez l'enfant, mais aussi chez l'adulte, une intervention sélective est la gestion de crise survenant en milieu familial, scolaire ou professionnel. Celles-ci seront abordées par une enquête, une explication de leur déclenchement et une adaptation du milieu aux particularités de la personne, comme c'est le cas pour les handicaps.

Ainsi, un enfant autiste grandira, se compliquera, étonnera ses parents et son entourage par une intelligence différente, avec le désir et la capacité de trouver une place sociale, et l'envie d'être heureux et un sentiment d'épanouissement personnel.

Laurent MOTTRON

psychiatre et chercheur
à l'Hôpital Rivière-des-Prairies
de l'Université de Montréal

stimule la lactation et dont on pense qu'elle favorise les liens mère-enfant. En février 2010, une équipe du CNRS a montré que 13 adolescents ayant un syndrome d'Asperger réussissaient mieux à identifier des photos de visages après avoir inhalé de l'ocytocine. Mais beaucoup reste à faire avant que l'on confirme que l'ocytocine améliore certains symptômes autistiques.

La recherche sur l'autisme progresse

La recherche sur les troubles du spectre autistique gagne du terrain dans les pays développés. En juin 2010, un consortium international de chercheurs, qui ont examiné les gènes de 996 enfants, a trouvé de nouveaux variants génétiques rares chez les enfants autistes. Certaines des muta-

tions détectées modifient des gènes impliqués dans la communication entre neurones. On pense d'ailleurs que des défauts dans les synapses, les points de contact entre neurones, seraient en cause dans l'autisme.

Le directeur de l'étude, Daniel Geschwind, de l'École de médecine David Geffen, à l'Université de Californie à Los Angeles, constate que les mutations diffèrent selon les enfants, mais qu'elles peuvent perturber les mêmes voies biologiques. Il a aussi créé une banque de ressources génétiques sur l'autisme, qui contient des échantillons d'ADN provenant de plus de 1200 familles où certaines personnes sont atteintes d'autisme.

Aujourd'hui, seule la thérapie comportementale repose sur quelques données scientifiques. Des milliers de parents espèrent que la science offrira un jour d'autres traitements. ■

✓ SUR LE WEB

Fondation FondaMental, réseau de coopération scientifique en santé mentale :
<http://www.fondation-fondamental.org/>

Association autisme France :
<http://autisme.france.free.fr/>

Fédération française sésame autisme, association de parents :
<http://www.sesame-autisme.com/>

Site de Stephen Barrett, psychiatre en Caroline du Nord, qui examine les traitements douteux : quackwatch.com.

Scarabées en vol... téléguidé

Michel Maharbiz et Hirotaka Sato

Des chercheurs conçoivent de minuscules robots volants, mi-insectes, mi-machines. Ces hybrides du vivant et de l'électronique pourraient un jour sauver des vies en cas de catastrophes ou de guerres.



La mouche domestique est une merveille de génie aéronautique. L'une des raisons pour lesquelles cet insecte échappe avec tant de virtuosité à la tapette est que ses ailes battent très vite, environ 200 fois par seconde. Pour atteindre ce rythme stupéfiant, la mouche met en œuvre une biomécanique complexe. Ses ailes ne sont pas attachées directement aux muscles du thorax. En fait, de façon cyclique, la mouche tend et relâche ces muscles, qui entraînent une modification de la forme du thorax. Cette déformation périodique fait osciller les ailes, un peu comme un choc fait vibrer un diapason. La mouche parvient ainsi, avec très peu d'effort, à convertir une toute petite quantité d'énergie en mouvements complexes et rapides.

Des ingénieurs, encouragés par la miniaturisation des circuits informatiques et les techniques de microfabrication, ont fait de leur mieux pour construire de minuscules machines volantes qui imitent cette capacité de locomotion.

Le *Delfly Micro*, dévoilé en 2008 par des chercheurs de l'Université de technologie

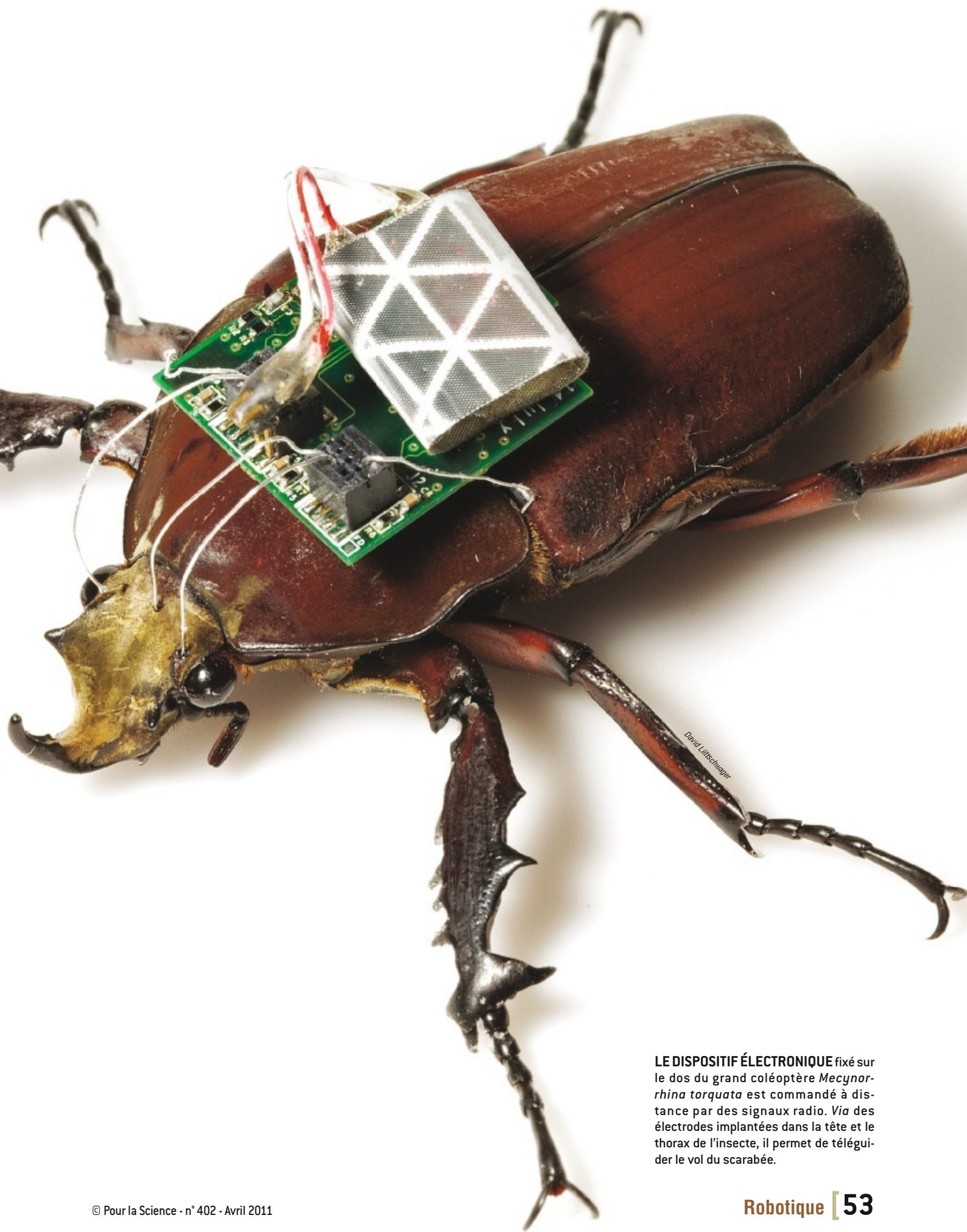
L'ESSENTIEL

- ✓ L'un des principaux obstacles à la mise au point de minirobots volants est que les piles actuelles ne permettent pas de les faire voler plus de quelques minutes.
- ✓ La télécommande d'insectes vivants, à l'aide d'électrodes implantées dans leurs circuits neuronaux et pilotées par ondes radio, permet de contourner le problème de la source d'énergie.
- ✓ Les insectes téléguidés intéressent beaucoup les militaires, mais ils pourraient aussi rendre de nombreux services dans le domaine civil.

de Delft, aux Pays-Bas, ne pèse que trois grammes, a des ailes de dix centimètres d'envergure et peut transporter une minuscule caméra vidéo. Le dispositif volant fabriqué au Laboratoire de microrobotique de Harvard est encore plus petit ; il pèse à peine 0,06 gramme (tout de même plus de quatre fois le poids d'une mouche...), mais une fois lancé, son vol ne peut être contrôlé. Le vrai talon d'Achille de ces insectes mécaniques est cependant la source d'énergie : personne n'a encore trouvé comment fabriquer une batterie assez petite et légère pour les alimenter en énergie pendant plus de quelques minutes.

Efficacité énergétique

Au cours des dernières années, nous avons pu contourner ces limites techniques. Au lieu de construire de toutes pièces un insecte robotique, nous utilisons les insectes eux-mêmes comme machines volantes. Nous pouvons ainsi nous passer des lourdes batteries et des techniques de microfabrication et nous concentrer uniquement sur des systèmes de commande



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. Maharbiz) 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

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 diapason. 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.

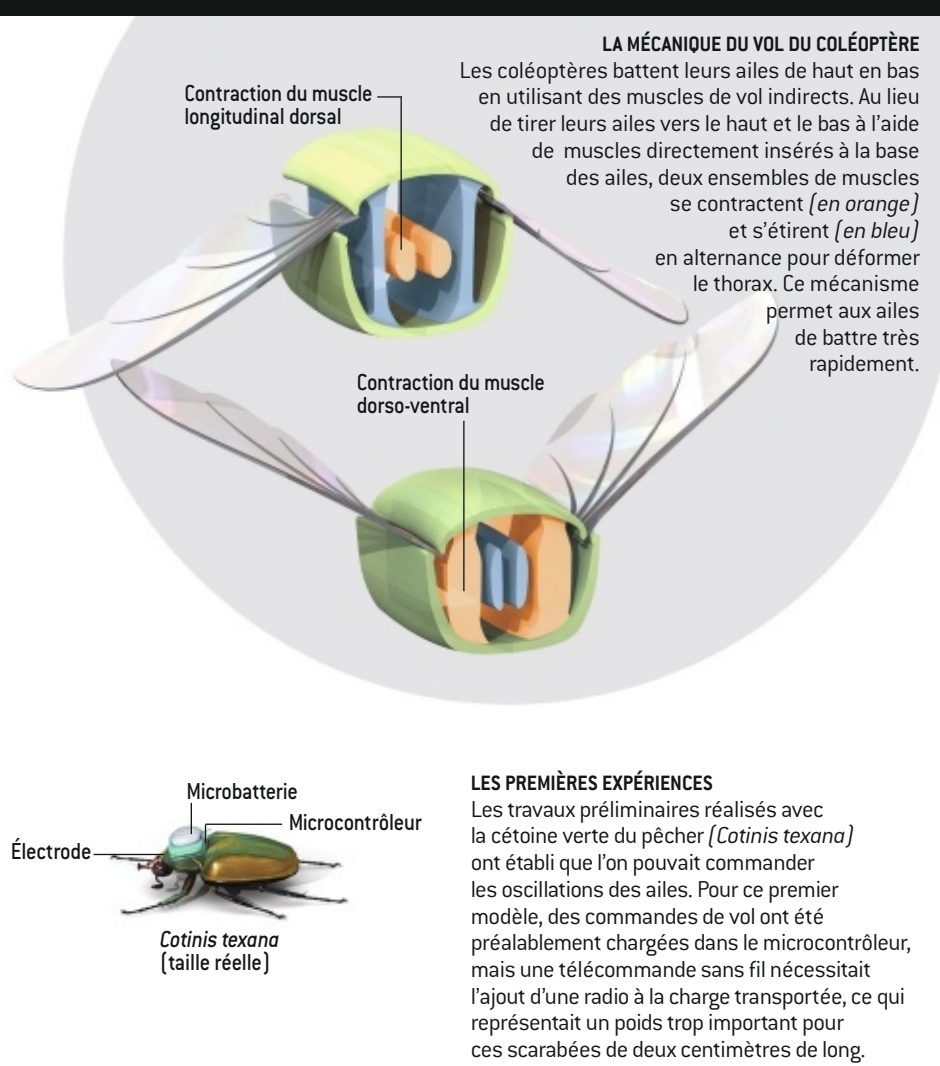
Il a d'abord fallu décider d'un ensemble minimal de comportements à contrôler. Nous ne voulions pas attacher les insectes à un fil pour régir leur comportement, comme d'autres l'ont fait; les attaches auraient été longues et se seraient enchevêtrées. Nous avons opté pour une télécommande radio, comme 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 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).

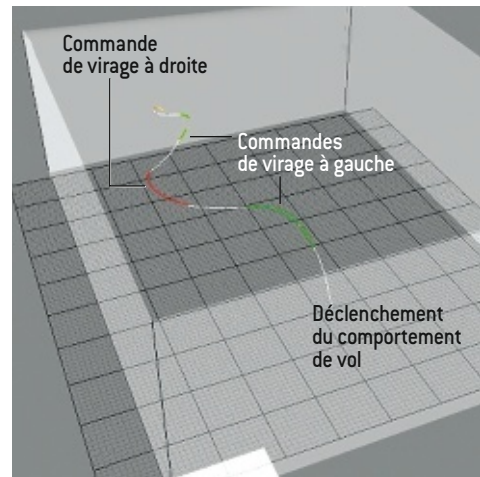
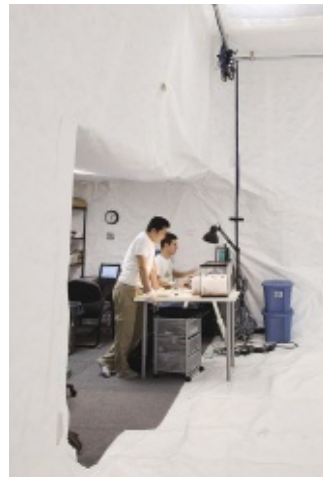
Il nous a fallu deux mois pour obtenir notre premier succès avec *Cotinis*. Au bout de plusieurs expériences, nous avons trouvé une zone de neurones relativement étendue qui, après stimulation électrique, permettait de produire des modulations de vol reproductibles et prévisibles.

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.



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.

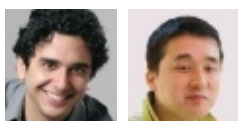
Nous avons aussi constaté qu'en appliquant des signaux marche/arrêt de façon répétée et très rapprochée pendant que l'insecte volait, nous pouvions moduler les oscillations des ailes. En d'autres termes, une fois l'insecte en vol, l'envoi de commandes rapides marche/arrêt les unes après les autres n'arrêtait 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 Gorkausen, 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

enregistrement 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.

La sélection **POUR LA SCIENCE**

Des livres scientifiques à la pointe de l'actualité



Le plus grand des hasards Surprises quantiques

Jean-François Dars et Anne Papillault

Comment pensent et à quoi rêvent les physiciens quantiques ? Soixante-cinq d'entre eux, couverts d'honneurs ou abordant leur thèse, racontent leurs hésitations, leurs angoisses, leurs efforts, leurs fatigues, leurs fureurs, leurs espoirs... Un témoignage précieux sur une science intrigante, accompagné de superbes photographies de ces chercheurs de l'extrême.

978-2-7011-5605-7 • 224 p. • 20,00 €



Les déchiffreurs Voyage en mathématiques

Jean-François Dars, Annick Lesne et Anne Papillault

Qui sont les mathématiciens ? Comment travaillent-ils ? Qu'est ce que l'intuition ? Autant de réponses que de questions dans cet ouvrage, où une cinquantaine de chercheurs, professeurs mondialement reconnus, médailles Fields ou jeunes thésards, proposent leur vision des mathématiques. Une plongée dans l'intimité de la création mathématique.

978-2-7011-4737-6 • 208 p. • 20,00 €



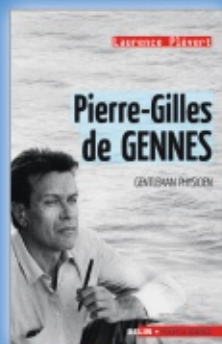
C. Ray et J.-C. Poizat

978-2-7011-4552-5 • 160 p. • 23,50 €



G. Pietryk

978-2-7011-3972-2 • 304 p. • 27,50 €



L. Plévert

978-2-7011-5228-8 • 368 p. • 23,00 €



B. Valeur

978-2-7011-4751-2 • 160 p. • 23,90 €



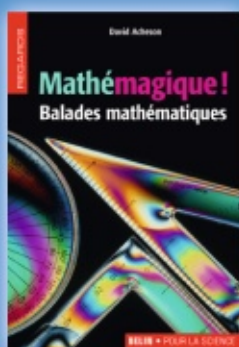
J.-P. Delahaye

978-2-8424-1825-0 • 224 p. • 24,00 €



J.-P. Delahaye

978-2-8424-5090-8 • 192 p. • 24,00 €



D. Acheson

978-2-7011-4285-2 • 176 p. • 18,50 €



N. Gauvrit

978-2-7011-4622-5 • 240 p. • 25,00 €

Feuilletez les premières pages de notre sélection de livres en exclusivité et commandez en ligne sur notre site

www.pourlascience.fr