

Les alternatives thérapeutiques aux cellules souches

Si les cellules souches ouvrent de nouvelles perspectives thérapeutiques pour les patients aveugles, une autre technique en est déjà au stade commercial : celle des prothèses rétiniennes. Ces dispositifs visent à stimuler artificiellement une rétine ayant perdu ses photorécepteurs. Les images, filmées par une caméra fixée sur une paire de lunettes, sont d'abord transformées en matrices d'impulsions électriques. Celles-ci sont ensuite transmises à des électrodes implantées sur la rétine résiduelle (*voir la figure ci-contre*).

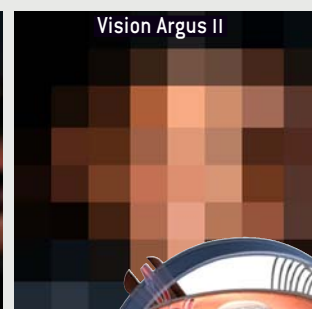
Commercialisée depuis deux ans en Europe, la première prothèse rétinienne opérationnelle a reçu l'autorisation de mise sur le marché aux États-Unis en février 2013. En France, quatre patients aveugles ont participé aux essais cliniques. Cependant, les images perçues ne sont constituées que de 60 points ou pixels, puisque l'implant n'a que 60 électrodes : c'est insuffisant pour bien voir une image complexe, tel un visage, mais suffisant pour une image simple, de sorte que certains patients sont capables de lire des lettres d'environ 10 centimètres de hauteur.

De nombreux chercheurs tentent d'augmenter le nombre de pixels, chaque électrode devant activer une zone disjointe de sa voisine. Ainsi, à l'Institut de la vision, on poursuit plusieurs objectifs : le développement de nouvelles formes tridimensionnelles pour les implants, avec l'ESIEE (École supérieure d'ingénieurs en électrotechnique et électronique) et le CEA ; l'utilisation de matériaux semi-conducteurs différents, tels le graphène et le diamant (projet européen NEUROCARE) ; l'amélioration du codage des informations visuelles.

Une piste alternative, la thérapie optogénétique, est inspirée d'algues unicellulaires et de bactéries dotées de protéines photosensibles. Ces protéines sont des canaux ioniques dont l'ouverture est contrôlée par la lumière. L'idée est d'insérer le gène qui les code dans les neurones non photosensibles de la rétine, qui pourraient alors être activés par la lumière. Ainsi, chaque cellule produisant les protéines jouerait le rôle d'un pixel. Ces protéines étant moins performantes que nos pigments visuels, les aveugles devront porter des lunettes rehaussant la luminance.

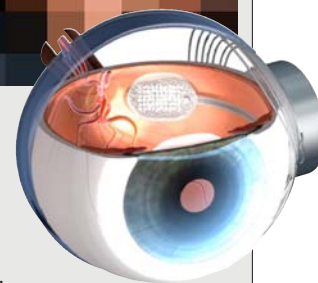


Vision normale



Vision Argus II

Le système Argus II (à droite) est la première prothèse rétinienne commercialisée. Les images captées par une caméra sont traduites en signaux envoyés à un récepteur (sur l'œil, à droite), puis transformées en impulsions électriques qui stimulent la rétine. Ce système n'a pour l'instant que 60 électrodes, donc 60 pixels. Les patients implantés voient donc mal les visages (ci-dessus à droite, le visage de George Clooney tel qu'il serait vu avec 64 pixels) mais peuvent lire des lettres. C'est un progrès notable.



Ainsi, dans le cadre du projet européen RETICIRC, nous avons rendu la vue à des souris aveugles grâce à une protéine bactérienne. Nous avons ensuite montré que cette protéine permet l'activation de cellules rétiniennes humaines par la lumière, grâce à des cultures de cellules prélevées post

mortem. Avant de passer à une application clinique, nous devons vérifier que la thérapie génique visant à faire exprimer la protéine bactérienne n'entraîne pas d'inflammation ou de rejet chez le primate.

Serge Picaud et José Sahel
Institut de la vision, Paris

Argus II. Second Sight. ©Shutterstock/Featureflash

Enfin, le glaucome endommage les cellules ganglionnaires, qui relient la rétine au cerveau *via* le nerf optique.

De ces trois maladies, la dégénérescence maculaire semble la plus susceptible d'être traitée par une thérapie cellulaire. Pour obtenir les cellules nécessaires au remplacement de l'épithélium pigmentaire rétinien endommagé, on transforme des cellules souches embryonnaires humaines ou des cellules souches pluripotentes induites, au sein de cultures conventionnelles ou flottantes. Des essais cliniques à petite échelle ont débuté aux États-Unis et sont prévus dans d'autres pays : les cellules d'épithélium pigmentaire issues de cellules souches sont injectées sous la rétine avec une fine aiguille, afin de remplacer au moins une partie du tissu endommagé.

Pour la rétinopathie pigmentaire, la thérapie cellulaire est une perspective plus lointaine. À l'inverse d'une culture classique, notre méthode peut engendrer une couche dense de bâtonnets facilement transplantable. En revanche, ces photo-

récepteurs doivent s'intégrer dans le circuit neuronal de l'œil – ce qui n'était pas nécessaire pour l'épithélium, simple tissu de soutien. Ainsi, ils doivent se connecter à un autre type de cellules sensorielles, les cellules bipolaires, et nous ne savons pas encore comment réaliser cette connexion.

Le glaucome pourrait être la plus difficile des trois maladies à traiter par thérapie cellulaire. Des cultures de cellules souches embryonnaires peuvent produire les cellules ganglionnaires nécessaires, mais dans l'œil postnatal, le nerf optique ne se reforme pas spontanément. Autrement dit, une fois les cellules ganglionnaires transplantées, on ne sait pas connecter leurs axones (les prolongements des neurones qui forment le nerf optique) aux cellules cérébrales.

Notre méthode a décuplé les possibilités des tissus formés à partir de cellules souches embryonnaires. Reste à découvrir ce qu'elle peut nous apprendre sur les mécanismes qui conduisent d'une cellule unique à un organe aussi complexe que l'œil... ■

■ BIBLIOGRAPHIE

T. Nakano *et al.*, Self-formation of optic cups and storable stratified neural retina from human ESCs, *Cell Stem Cell*, vol. 10, pp. 771-785, 2012.

D. Schwartz *et al.*, Embryonic stem cell trials for macular degeneration : a preliminary report, *Lancet*, vol. 379, pp. 713-720, 2012.

M. Eiraku *et al.*, Self-organizing optic-cup morphogenesis in three-dimensional culture, *Nature*, vol. 472, pp. 51-56, 2011.

LES ROBOTS



L'ESSENTIEL

- Pour mettre au point des robots de la taille d'un insecte, l'emploi de composants ordinaires (moteurs, paliers, etc.) est exclu.
- Ces minirobots doivent utiliser des muscles artificiels spécialement conçus pour actionner et commander le vol.
- Ils agiront de façon autonome, en utilisant des capteurs miniaturisés et des microprocesseurs traitant l'information ainsi recueillie.
- Dans des essais de milliers d'individus, leurs actions devront se coordonner sans agents centralisateurs, ce qui nécessite la conception de nouveaux langages de programmation.

Travis Rathbone



-ABEILLES

Robert Wood, Radhika Nagpal et Gu-Yeon Wei

Un essaim de milliers de robots volants de la taille d'un insecte et se partageant les tâches pour réaliser un objectif commun : ce projet constitue un défi mécanique, électronique et informatique.

Il n'y a pas si longtemps, un mal mystérieux, le « syndrome d'effondrement des colonies d'abeilles », a commencé à décimer les ruches dans le monde entier. Les abeilles sont responsables d'une bonne partie de la pollinisation des plantes, et leur déclin nourrit la crainte que l'agriculture en pâtisse. Serons-nous un jour contraints d'utiliser des dispositifs artificiels si elles venaient à disparaître ?

En 2009, avec des collègues de l'Université Harvard et de la *Northeastern University*, nous avons entrepris de créer une colonie d'abeilles robotisées. Nous nous demandons si des abeilles mécaniques pourraient reproduire non seulement le comportement d'insectes pris séparément, mais aussi le comportement unique qui émerge de milliers d'abeilles en interaction. À l'heure actuelle, nous avons déjà créé les premières *RoboBees* (robots-abeilles) – des robots volants de la taille d'une abeille – et nous travaillons sur des méthodes qui permettraient de faire coopérer des milliers de ces robots-abeilles comme les abeilles le font dans une ruche.

À première vue, la tâche semble presque impossible. Des millions d'années d'évolution ont modelé les abeilles, insectes

qui sont devenus de fantastiques machines volantes. Leur minuscule corps peut voler des heures durant, maintenir sa stabilité en vol au cours des tempêtes, rechercher des fleurs et éviter les prédateurs. Essayez donc de réaliser cela avec un robot de la taille d'une pièce de monnaie !

Un essaim sans agents centralisateurs

Considérons maintenant la ruche. Une colonie d'abeilles semble ne pas avoir de dirigeant ou d'autorité centralisée. Et pourtant, des colonies de dizaines de milliers d'abeilles se répartissent intelligemment le travail pour accomplir des tâches indispensables au groupe. Quand la ruche a besoin de plus de pollen, des abeilles supplémentaires partent à la recherche de nourriture ; quand la ruche a besoin d'être entretenue, les abeilles ne sortent pas et s'en occupent. Et lorsque quelque chose va mal – par exemple une reine qui meurt inopinément –, les abeilles s'adaptent rapidement.

Comment, en l'absence d'agents centralisateurs, une colonie aussi importante prend-elle ces décisions complexes si vite

1. LE ROBOT-ABEILLE
conçu par les auteurs et leurs collègues est ici agrandi. Sa largeur réelle (ailes non comprises) est celle d'un doigt.

et évite-t-elle les risques d'une mauvaise communication ?

Une ruche de robots pourrait faire bien plus que de la pollinisation des fleurs (bien que l'agriculture soit une utilisation potentielle). Des robots petits, agiles, simples et peu coûteux pourraient effectuer de nombreuses tâches plus efficacement qu'un petit nombre de robots très performants.

Par exemple, imaginons un secouriste équipé d'une boîte remplie de 1000 robots-abeilles – un ensemble qui pèserait moins

d'un kilogramme. Ces robots-abeilles pourraient être lâchés sur un site ravagé par un tremblement de terre pour rechercher de la chaleur, des voix ou du dioxyde de carbone, qui signalent la présence de survivants. Si seulement trois de ces robots menaient leur mission à bien tandis que tous les autres échouaient, l'essaim aurait réussi à atteindre son objectif. On ne peut pas en dire autant de la génération actuelle de robots secouristes, qui sont bien plus encombrants et coûtent chacun près de 10 000 euros !

Cependant, la réalisation d'une colonie de minirobots volants nécessite de surmonter une kyrielle de défis technologiques. Ces robots ne devront pas mesurer plus de quelques centimètres et peser environ un demi-gramme – environ 100 fois moins que le plus léger appareil volant autonome existant aujourd'hui. Ce dispositif minuscule doit renfermer le système de vol de chaque robot-insecte, son cerveau électronique et son système de vision, ainsi que les commandes qui régissent ses interactions avec les autres membres

LE PROJET ROBEBEE

Le projet *RoboBee* (robot-abeille) a pour but de créer un robot volant autonome de la taille d'un insecte. Les robots-abeilles seront capables de voler grâce à leur propre énergie, de se transporter vers un objectif donné, de s'adapter à des circonstances changeantes et de travailler de façon collective.

Capteur de flux optique

Actionneur de commande

Actionneur principal

Microprocesseur

Circuits d'alimentation

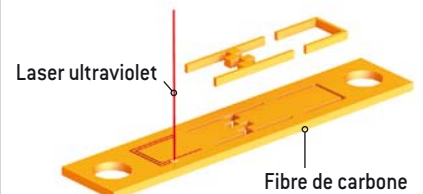
Batterie



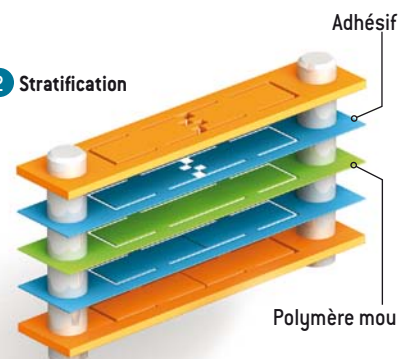
Le RoboBee en taille réelle

Sur ce châssis minuscule, un robot-abeille doit transporter ses muscles artificiels, des capteurs optiques, des processeurs informatiques et une source d'énergie pour faire fonctionner tous ces éléments. L'ensemble pèse environ un demi-gramme.

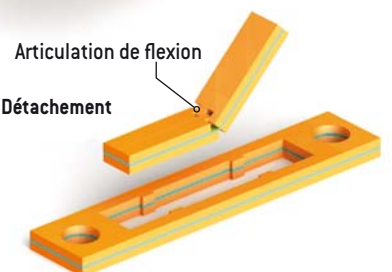
1 Usinage



2 Stratification



3 Détachement



de sa ruche. De récents progrès dans les domaines de la science des matériaux, de la technologie des capteurs et des architectures informatiques mettent ces objectifs à notre portée.

Imiter les muscles alaires d'un insecte

Le défi le plus évident pour la création d'un minirobot volant est de trouver une façon de le faire voler. Malheureusement, les progrès continus réalisés dans la minia-

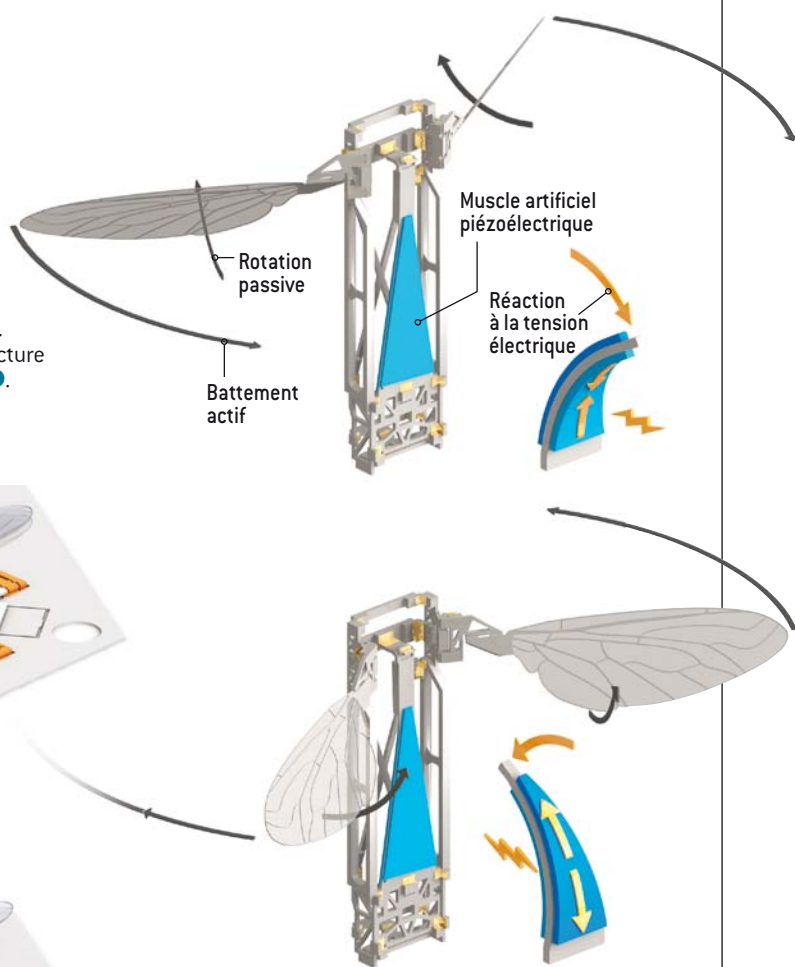
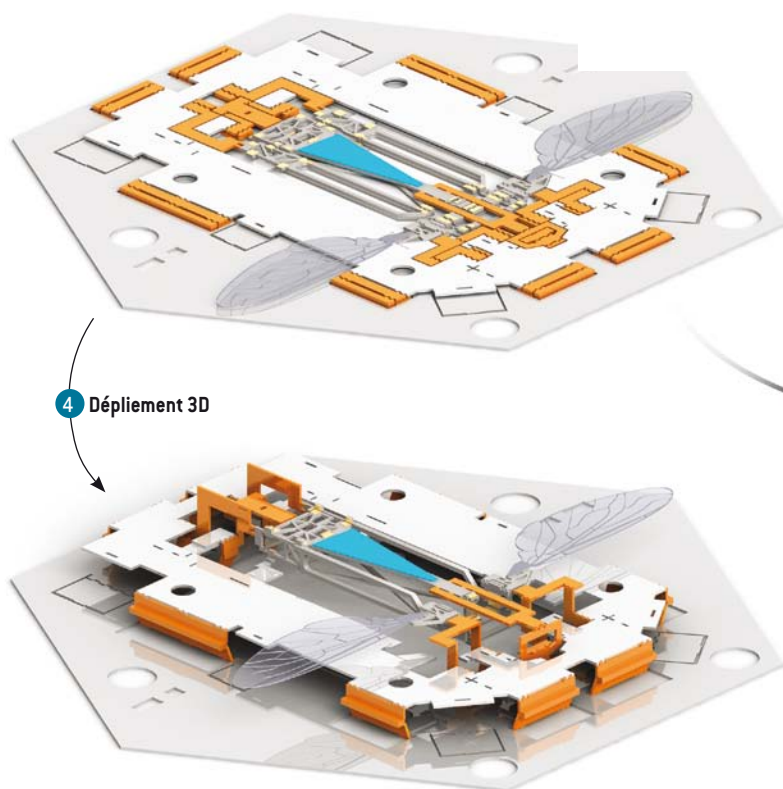
turisation des robots ces dix dernières années ne nous sont pas d'une grande aide, car la petite taille du robot-abeille modifie la nature des forces en jeu. Les forces de surface telles que le frottement commencent à prédominer par rapport aux forces volumiques telles que la gravité ou l'inertie. Ce problème d'échelle exclut la plus grande partie de la boîte à outils usuelle des ingénieurs mécaniciens, notamment les paliers rotatifs, les engrenages et les moteurs électromagnétiques – des composants universels dans

les robots plus grands, mais inefficaces pour un robot-abeille.

À la place de moteurs rotatifs et d'engrenages, nous avons conçu un robot-abeille dont l'anatomie reflète au plus près un insecte volant – les ailes de ce dernier étant actionnées par des muscles artificiels (voir l'encadré ci-dessous). Notre dispositif utilise deux types de « muscles » agissant à l'articulation entre les ailes et le corps. Des actionneurs de puissance relativement grands font osciller le mécanisme aile-thorax pour faire battre l'aile, tandis que

La chaîne de montage

La fabrication de robots aussi petits présente de nombreux défis. Chaque *RoboBee* est construit à partir de couches de matériau dur, en fibre de carbone par exemple, intercalées avec des polymères plus mous. Des trous dans la fibre de carbone permettent aux polymères de fléchir, créant ainsi une articulation de flexion. Cette méthode de stratification a l'avantage de se prêter à une chaîne de montage efficace (ci-dessous à gauche). On réalise d'abord des découpes précises à l'aide d'un laser ultraviolet ①. Puis on aligne les couches et on les assemble avec un adhésif ②. On détache ensuite les composants du substrat ③. Enfin, la structure tridimensionnelle est montée grâce à un dépliement approprié ④.

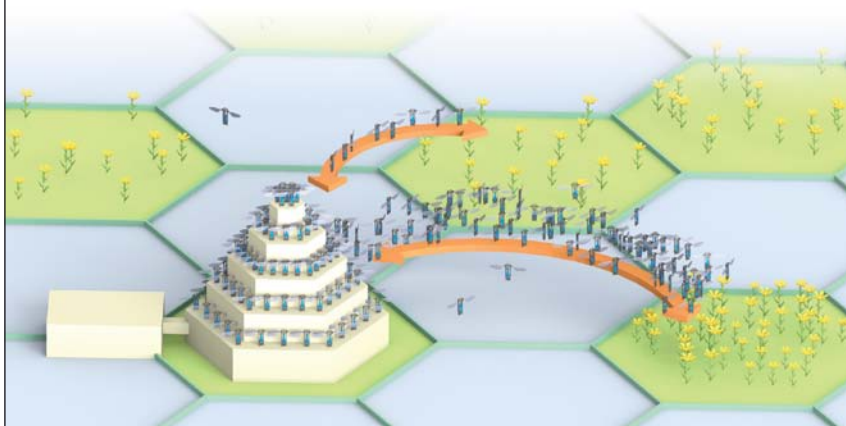


Le battement de l'aile

Le vol du *RoboBee* est assuré par des muscles artificiels, formés de matériaux piézoélectriques qui se contractent sous l'effet d'une tension électrique. Les ailes peuvent se mouvoir de deux façons : un battement d'avant en arrière et une rotation sur elles-mêmes (comme quand on flotte dans une piscine à l'aide des bras). Les muscles artificiels commandent le battement, mais la rotation est passive (elle est régie par l'inertie de l'aile, l'interaction de l'aile avec l'air et l'élasticité de la charnière de l'aile).

LA COLONIE AU TRAVAIL

Une colonie de milliers de robots-abeilles devra assigner, avec efficacité, des tâches aux différents individus qui la composent, même en l'absence d'une vision globale de l'environnement. Dans le scénario illustré ci-dessous, la ruche a pour tâche de trouver et polliniser des champs de fleurs. Pour commencer, des robots-abeilles explorent différentes régions. À leur retour à la ruche munis d'informations sur les endroits où les fleurs abondent, ces nouvelles informations sont utilisées pour déterminer les zones où se rendront les futures ouvrières. Davantage de robots seront assignés aux zones où il y a plus de travail. Cette stratégie fondée sur la ruche permet aux abeilles de faire montre d'une intelligence collective, même si les contraintes énergétiques limitent la communication entre individus.



des actionneurs de commande plus petits règlent avec précision les mouvements de l'aile pour engendrer un couple destiné aux contrôles et manœuvres de vol.

Le muscle artificiel est constitué de matériaux piézo-électriques qui se contractent quand leur épaisseur est soumise à une tension électrique. Ces actionneurs présentent quelques inconvénients – par exemple, ils nécessitent une tension élevée et sont fragiles –, cependant, ils constituent un cas où la physique de « l'effet d'échelle » est de notre côté. En effet, plus ces actionneurs sont petits, plus ils vont se mouvoir rapidement. Et comme la quantité de travail fournie par cycle (et par unité de masse) reste à peu près constante, un battement plus rapide conduit à une plus grande puissance. De fait, ces muscles développent une puissance comparable à celle des muscles d'insectes de taille similaire.

Au cours de ces dernières années, nous avons expérimenté des dizaines de configurations différentes d'actionneurs et d'articulations. Pour chacune, nous avons notamment cherché à déterminer la facilité avec laquelle nous pouvions la réaliser concrètement, puisque des ruches de robots-abeilles nécessiteront de la production en masse.

Les meilleures ébauches que nous ayons trouvées jusqu'à présent sont fondées sur un sandwich de trois couches : deux plaques dures enserrant un film mince de polymère. Nous créons des articulations en découpant du matériau des couches supérieure et inférieure, ce qui permet à la couche intermédiaire de polymère de fléchir, créant ainsi une articulation de flexion (voir l'encadré pages 66-67).

La source d'énergie, un problème encore non résolu

Nous avons bien progressé dans la construction d'un robot de la taille d'une abeille, mais nous essayons toujours de trouver la meilleure façon de l'actionner. Pour surmonter les fortes contraintes énergétiques du vol à ces petites échelles, une grande partie de la masse du robot doit être consacrée à l'actionneur principal et à la source d'énergie (on peut penser « batterie » ou « piles », bien que nous étudions aussi la possibilité d'utiliser une micropile à combustible à base d'oxyde solide). Ce problème d'énergie a tout d'un cercle vicieux : une importante unité d'alimentation stocke plus

d'énergie, mais nécessite un système de propulsion plus important pour compenser l'augmentation de poids, système qui nécessite à son tour une source d'énergie encore plus volumineuse.

Bien que nous ne puissions pas encore faire voler un robot-abeille grâce à sa propre énergie, nous avons fait la démonstration d'un minirobot de 100 milligrammes capable de produire assez de poussée pour décoller (nous l'avons relié à une source externe d'énergie). Le robot-abeille était également capable de se stabiliser en utilisant une combinaison de mécanismes actifs et passifs. Avec les technologies les plus en pointe en matière de densité d'énergie des piles et au vu de l'efficacité de tous les composants du corps, nous estimons que la durée de vol ne dépasserait pas quelques dizaines de secondes. Pour accroître cette durée, nous cherchons à réduire la masse et à renforcer l'efficacité de chacun des composants du robot.

L'énergie n'est pas le seul facteur qui bride notre robot-abeille. Un cerveau électronique embarqué constitue un autre problème non résolu. Sur le terrain, un robot-abeille devra constamment évaluer son environnement, décider de la meilleure ligne de conduite et commander ses mécanismes de vol. Un dispositif électronique externe fonctionne comme une solution d'appoint dans le laboratoire, mais un robot-abeille en plein travail aura besoin de son propre cerveau.

À un niveau supérieur, le cerveau n'est pas seulement responsable de la commande d'un robot-abeille individuel, mais aussi de la gestion de ses interactions avec les autres robots-abeilles de la colonie. Nous avons entrepris de construire ce cerveau en couches – des capteurs permettant d'interpréter l'environnement physique, un système nerveux électronique qui traite les fonctions de commande de base et un cortex électronique programmable pour prendre des décisions.

Dans une première étape, nous cherchons à mettre au point un sous-système cérébral permettant de voler de façon autonome. Réaliser ce défi suppose une boucle de commande bien ajustée qui englobe des capteurs, des processeurs dont le rôle est de traiter les informations issues des capteurs, mais aussi de commander les actionneurs piézoélectriques. Ce sont ces derniers qui font bouger les différentes parties du corps du robot.

Pour imaginer quels capteurs utiliser et comment structurer le circuit cérébral, nous nous sommes, une fois encore, inspirés de la nature. Les mouches (et d'autres animaux) utilisent deux grands types de capteurs pour se diriger. Les capteurs proprioceptifs donnent à une mouche des informations sur son état interne – la vitesse de battement de ses ailes, par exemple, ou la configuration de ses pattes. Les capteurs extéroceptifs livrent, eux, des informations sur le monde extérieur.

Un système visuel simple, mais efficace

La technologie moderne nous offre des systèmes de géolocalisation, des accéléromètres et des gyroscopes multiaxes, mais ces différents capteurs sont trop lourds ou consomment trop d'énergie pour être utiles. C'est pourquoi nous recherchons un système de vision électronique analogue à celui des vraies abeilles – un système qui analyse le « flux optique », le mouvement apparent des objets dans le champ visuel d'un capteur d'images. Imaginez ce que voit le passager d'une voiture à travers une vitre latérale : les objets proches semblent se déplacer rapidement dans son champ de vision, tandis que les objets éloignés se déplacent lentement. Un système visuel qui utilise cette information peut créer une représentation tridimensionnelle détaillée de son environnement, même s'il n'est équipé que d'un petit capteur d'images simple.

Toutefois, le cerveau de notre robot-abaille doit être suffisamment puissant pour traiter le flux de données provenant de ses capteurs d'images et prendre les décisions appropriées pour diriger les actionneurs du corps. Ici encore, les composants disponibles les plus perfectionnés ne nous sont d'aucune utilité, car trop lourds et gourmands en énergie. En conséquence, nous avons envisagé un nouveau type d'architecture informatique pour le cerveau du robot-abaille, en associant une informatique polyvalente à des circuits spécialisés qualifiés d'accélérateurs.

Contrairement aux microprocesseurs polyvalents (les puces à tout faire qui font tourner les ordinateurs personnels classiques), les circuits accélérateurs sont des blocs de circuits précisément réglés qui ne font qu'une seule chose, mais qui la font bien. Il nous fallait des circuits intégrés accélérateurs pour effectuer les calculs rapides, en

temps réel, de la boucle de rétroaction qui assure la stabilité du vol, tout en limitant strictement la consommation d'énergie.

Un défi majeur a été de trouver quels compromis nous pouvions faire. Par exemple, nous aimerions utiliser une caméra à haute résolution. Cependant, une haute résolution (un grand nombre de pixels) nécessite des capteurs d'images plus grands, donc plus de puissance informatique pour traiter les images. Où se situe l'optimum ?

Pour répondre à ce type de questions, nous avons développé une salle de test spéciale. Nous avons monté un corps de robot-abaille sur un capteur de forces et de couples, et nous lui avons fait battre des ailes. Sur les parois de cette chambre de test, nous projetons des images de l'environnement physique où le robot-abaille devrait voler. Nous pouvons ainsi étudier comment le système visuel, le cerveau et le corps prototypes fonctionnent de conserve pour orienter le minirobot.

Le contrôle du vol n'est qu'un début, bien sûr. Nous étudions aussi d'autres types de capteurs qui permettraient aux robots-abailles d'accomplir des tâches particulières, par exemple localiser une personne emprisonnée dans les décombres à la suite d'un tremblement de terre.

Une capacité que nous ne prévoyons malheureusement pas pour nos robots-abailles actuels est la communication directe d'un minirobot à l'autre – les coûts énergétiques liés à des communications sans fil sont tout simplement trop élevés. Cependant, cela ne signifie pas que les robots-abailles devront agir seuls.

De l'intelligence en essaim

Pris isolément, un robot-abaille sera minuscule et limité par rapport au monde dans lequel nous espérons le faire fonctionner ; de plus, les contraintes en termes d'énergie et de poids restreignent fortement les types de matériel de détection et de communication qu'un tel minirobot peut transporter. C'est pourquoi il nous faut aussi trouver comment construire une colonie. Comme avec les vraies abeilles, un seul robot-abaille ne peut pas accomplir grand-chose. Mais une ruche ? Un comportement de groupe permettrait aux robots-abailles d'explorer de grandes étendues, de sélectionner les zones intéressantes en y effectuant de nombreuses observations simples, de se

■ LES AUTEURS



Robert WOOD est professeur d'ingénierie et de sciences appliquées à l'Université

Harvard (États-Unis), où il est membre de l'Institut Wyss d'ingénierie bio-inspirée.



Radhika NAGPAL est professeur d'informatique à l'Université Harvard et membre

de l'Institut Wyss.



Gu-Yeon WEI est professeur de génie électrique et d'informatique à l'Université Harvard.

■ BIBLIOGRAPHIE

M. Rubenstein *et al.*, **Kilobot : A low cost scalable robot system for collective behaviors**, 2012 *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3293-3298, 14-18 mai 2012.

R. J. Wood *et al.*, **Progress on « pico » air vehicles**, *International Journal of Robotics Research*, vol. 31(11), pp. 1292-1302, septembre 2012.

D. Cox-Foster et D. van Engelsdorp, **Sauvons les abeilles**, *Pour la Science*, n° 379, mai 2009 (http://bit.ly/pls379_abeilles).



CHRS

2. LE PROTOTYPE DE ROBOT-INSECTE du projet français OVMI [projet ANR *Objet Volant Mimant l'Insecte*, <http://ovmi.iemn.univ-lille1.fr/>, de 2005 à 2008] a une envergure de 3,5 centimètres. Le mode d'actionnement de ses ailes est électromagnétique. Les programmes de l'ANR intitulés EVA [*Entomoptère Volant Autonome*] et IN-ART [*Insecte ARTificiel volant*] poursuivent ces travaux en utilisant des muscles artificiels.

répartir efficacement les tâches et de prospérer même si une partie des individus échouent. Des essaims de petits robots agiles et éventuellement jetables donneraient lieu à de nombreuses applications nouvelles – inspection de lieux dangereux ou difficiles d'accès, pollinisation, localisation de rescapés, etc.

Depuis le début des années 1990, les chercheurs informaticiens travaillant dans le domaine de « l'intelligence en essaim » ont conçu de nombreux algorithmes de coordination puissants inspirés par les insectes sociaux – depuis les stratégies de recherche coordonnée jusqu'au partage intelligent du travail. Mais même avec ces algorithmes, des essaims de robots ne peuvent pas être gérés à la façon d'un robot unique.

La programmation et le raisonnement au niveau des individus deviennent impossibles avec des milliers d'entités. Ce serait comme demander à un développeur de logiciels de s'asseoir à son bureau et de rédiger des instructions gérant chaque bit physique d'un ordinateur. Au lieu de cela, tout comme les compilateurs traduisent les instructions d'un programme informatique écrit dans un langage compréhensible par un humain en une suite de 0 et de 1 qui commandent les transistors d'un microprocesseur, il nous faut un moyen de programmer à un niveau supérieur, c'est-à-dire de programmer la colo-

nie comme un tout – une façon de traduire des instructions globales en programmes comportementaux individuels. Autrement dit, nous avons besoin d'un langage de programmation pour colonies.

Quel est le bon langage capable de saisir ce que font les colonies d'abeilles domestiques et ce que nous souhaitons faire avec les colonies de robots-abeilles ? Il n'existe pas encore de réponse simple, mais, pour débiter, nous avons développé deux langages abstraits. Dans le langage

IL DEVIENT IMPOSSIBLE de programmer, à l'échelle des individus, une ruche de plusieurs milliers de minirobots.

Karma, on peut spécifier un organigramme de tâches que doit accomplir la colonie. Cet organigramme contient des liens représentant des conditions qui déclenchent de nouvelles tâches. Le système *Karma* utilise des informations en provenance des individus pour ajuster l'affectation des ressources aux différentes tâches, d'une façon qui reproduit le rôle de la ruche dans les colonies d'abeilles réelles.

Une approche différente, nommée OptRAD (pour *Optimizing Reaction-Advection-Diffusion*), traite la colonie de robots aériens comme un fluide qui diffuse dans l'environnement. Chaque robot-abeille utilise un algorithme probabiliste pour

déterminer s'il va exécuter une tâche, en se fondant sur l'état actuel de l'environnement. Traiter le système comme un fluide permet à OptRAD de raisonner, à un niveau supérieur, sur les résultats attendus et d'ajuster le comportement du système pour qu'il s'adapte à de nouvelles circonstances.

Nous avons aussi beaucoup à apprendre sur la construction et la mise en service d'une grande colonie de robots, qui ne contient pas des dizaines ou des centaines de robots autonomes, mais des milliers. Avec de tels nombres, faire fonctionner ces robots au niveau des individus devient impossible. Imaginons que chaque robot ait un interrupteur marche-arrêt : s'il fallait cinq secondes pour allumer chacun d'eux, alors mettre en marche 1 000 robots prendrait près d'une heure et demie. Des contraintes similaires s'appliquent à chaque élément, du coût jusqu'à la maintenance – chaque robot doit être bon marché, facile à fabriquer et à faire fonctionner de façon collective. Idéalement, chaque opération doit être mesurable – elle devrait nécessiter une durée constante, qui n'augmente pas avec la taille de la ruche (ou du moins qui n'augmente que très lentement).

Ces défis nous ont incités à créer le système *Kilobot* – un ensemble d'une centaine de robots, chacun de la taille d'une pièce de monnaie, qui se déplacent par vibration et qui communiquent avec d'autres Kilobots voisins. Nous pouvons utiliser cet essaim de minirobots pour tester l'efficacité de nos langages de programmation et de nos modèles mathématiques de comportement émergent. Après tout, si nous n'agissons pas avec du matériel bien réel, nous avons peu de chances de comprendre le comportement émergent des systèmes physiques.

L'essaim de Kilobots peut être utilisé pour tester de nombreux comportements collectifs que nous souhaiterions finalement voir adopter par nos colonies de robots-abeilles. Par exemple, nous pouvons demander à l'essaim de rechercher des cibles dans un environnement donné, puis, une fois que l'un des Kilobots a trouvé une cible, lui demander de rapporter sa localisation à l'ensemble de l'essaim. Nous avons aussi fait en sorte que notre conception du Kilobot soit disponible pour d'autres équipes de chercheurs souhaitant construire leurs propres robots. On peut également se procurer des Kilobots préfabriqués auprès de

K-Team, une société de robotique. Nous espérons que ce type de « kit » robotique standardisé fera émerger de nouvelles idées et amènera des progrès scientifiques qu'une seule équipe ne peut pas réaliser seul – après tout, nous aussi, nous dépendons d'une énergie collective pour devenir plus que la somme de nos constituants.

Une technologie mûre d'ici une quinzaine d'années ?

Bien que de nombreux progrès aient été accomplis, il nous reste encore beaucoup de travail. Nous pensons que d'ici quelques années, nous disposerons de robots-abeilles volant dans des conditions de laboratoire étroitement contrôlées. Cinq à dix ans plus tard, vous pourrez sans doute les voir couramment utilisés.

En 1989, le roboticien d'origine australienne Rodney Brooks a écrit un article

sur les avantages des petits robots pour l'exploration spatiale, intitulé *Fast, Cheap, and Out of Control : A Robot Invasion of the Solar System* (solide, bon marché et autonome : une invasion du Système solaire par des robots). Il s'agit, bien sûr, d'un clin d'œil au vieil adage des ingénieurs selon lequel les produits de grande consommation peuvent être caractérisés typiquement par deux – mais pas trois – des adjectifs suivants : solide, bon marché et fiable. Avec de nombreux individus, l'absence d'une de ces caractéristiques n'a guère d'importance.

R. Brooks était prophétique dans son interprétation de ce concept dans le domaine de la robotique. À condition que nous puissions fabriquer de nombreux robots simples qui collaborent avec efficacité, peu importe si certains individus échouent de temps en temps. La seule façon d'assurer le succès des explorateurs robotisés est de leur permettre, occasionnellement, de tomber du ciel ! ■

■ SUR LE WEB

Envol de *Robobees* :
www.ScientificAmerican.com/mar2013/robobees

Vidéos *YouTube* du Laboratoire de microrobotique de Harvard :
www.youtube.com/MicroroboticsLab

universcience présente

conférences

Palais DÉCOUVERTE **cité des sciences & de l'industrie**

journées masse des corps

entrée libre

au Palais de la découverte

Samedi 20 avril à 14h

Boson de Higgs : la genèse d'une découverte

Jean Iliopoulos et Achille Stocchi retracent l'épopée de la découverte du boson de Higgs. Des démonstrations effectuées en direct sur les détecteurs du Palais de la découverte illustreront leurs propos.

→ Salle de conférence du Palais de la découverte

à la Cité des sciences et de l'industrie

Vendredi 19 avril à 18h

Masse des corps : du Higgs à la matière noire

En quoi la découverte du boson de Higgs modifie notre compréhension de la masse. Étienne Klein et Marc Lachièze-Rey vous l'expliquent.

→ Auditorium de la Cité des sciences et de l'industrie

Avec le soutien de

SCIENCE SCIENCE VIE culture plus

programme complet sur www.universcience.fr

HISTOIRE DES SCIENCES

L'instinct maternel sous la III^e République

L'amour maternel est-il inné ? Tandis que les Républicains puisaient dans le règne animal des exemples en faveur du rôle nourricier de la femme, d'autres études révélaient la fragilité de ces explications biologisantes...

Marion THOMAS

L'amour maternel est-il un instinct ou un sentiment ? Le souci de son enfant est-il inné chez la femme ? Ou devient-elle femme en suivant les injonctions prescrites par les valeurs de son époque, valeurs qui servent l'image de la « bonne mère » avec son cortège de qualificatifs : dévotion, sacrifice et abnégation ? En d'autres termes, l'instinct maternel est-il naturel ou mythique, inventé par une société en vue de justifier, voire renforcer, certaines conventions sociales liées au sexe, telles que le rôle des femmes dans la société ou la division sexuelle des tâches ?

La question fait toujours l'objet de débats aujourd'hui. Mais dans la France de la fin du XIX^e siècle, elle constituait un enjeu politique majeur. Pour les Républicains, la femme devait obéir à sa nature de nourricière et d'éducatrice afin d'assurer la reproduction des générations à venir et donc le futur de la République. Qu'en pensaient des naturalistes tels que Jean-Henri Fabre, Edmond Perrier et Alfred Giard, dont les recherches visaient justement à décrire des comportements rencontrés dans la nature ? Nous allons voir que chacun fut, d'une façon ou d'une autre, influencé dans ses études sur l'instinct maternel animal par l'idéologie politique du moment. L'un d'eux, Perrier, a même mis ses travaux au service de la politique dominante...

Le plus modéré des trois était sans doute Fabre. Passionné d'entomologie, le naturaliste a publié entre 1879 et 1907, sous le titre *Souvenirs entomologiques*, un recueil en dix volumes d'observations sur les mœurs et

les instincts des insectes, et de méditations sur la nature. Fabre a écrit cette œuvre à la fin de sa vie, à un moment où, après de longues années dédiées à l'enseignement des sciences, il s'est consacré à l'écriture de textes d'histoire naturelle pour le grand public. Peu enclin à fréquenter la communauté scientifique et encore moins les milieux parisiens (il vivait en Provence), Fabre avait cependant développé une amitié forte avec un homme politique, Victor Duruy.

Fabre, partisan de l'instruction des femmes

Ministre de l'Instruction publique sous le régime de Napoléon III et réformateur de l'éducation primaire et secondaire, Duruy avait lancé l'idée d'une éducation laïque pour les jeunes filles, dont l'instruction avait été jusqu'alors le monopole des cléricaux. Son combat avait abouti en décembre 1880 avec la loi Camille Sée, qui non seulement assurait une formation scolaire au-delà d'une alphabétisation en voie d'achèvement, mais proposait aussi d'« arracher les filles à l'Église » en établissant un enseignement secondaire laïque pour elles. Fervent partisan du programme de Duruy, Fabre affirme dans ses *Souvenirs*, au détour d'une réflexion sur la part sauvage de l'homme (après avoir comparé la méthode de chasse des carabes dorés à un abattoir de Chicago), son engagement pour l'instruction féminine : « On a reconnu enfin que la femme possède une âme pareille à la nôtre, supérieure même en tendresse et en dévouement. On lui a permis de s'instruire,

ce qu'elle fait avec un zèle au moins égal à celui de son concurrent. Mais le Code, caverne d'où ne sont point encore délogées bien des sauvageries, continue à la regarder comme une incapable, une mineure. Le Code, à son tour, finira par céder sous la poussée du vrai. L'abolition de l'esclavage, l'instruction de la femme, voilà deux pas énormes dans la voie du progrès moral. »

À l'instar de Duruy, Fabre partageait l'idéal d'émancipation du peuple par l'éducation et le travail. Il était convaincu qu'il était possible d'éveiller l'intérêt des jeunes garçons et des jeunes filles à des sujets divers, spécialement l'histoire naturelle, tout autant que de les éduquer moralement grâce à la science. Cette mission d'éducation populaire, qui s'inscrivait dans une dynamique de sécularisation de la société, ne se fit pas sans tensions. Duruy comme Fabre furent malmenés par les cléricaux pour leurs hardiesses laïques et leurs atteintes aux privilèges de l'Église quant à l'éducation des filles.

Dans ce contexte, si Fabre n'extrapole jamais de description d'insecte au modèle féminin, ses idées progressistes transparaissent néanmoins dans ses observations sur l'instinct maternel animal. À travers le portrait des mœurs de mères insectes, Fabre fait osciller l'image de la femme entre deux pôles : la mère dévouée et, à l'opposé, négligente. Sous sa plume, c'est la femelle scarabée qui incarne le mieux l'image de la mère dévouée à sa progéniture, au point « dans sa tendresse », de « perdre le besoin de manger » et de rester « au fond d'un terrier, quatre mois durant, à veiller sur sa nichée ».