

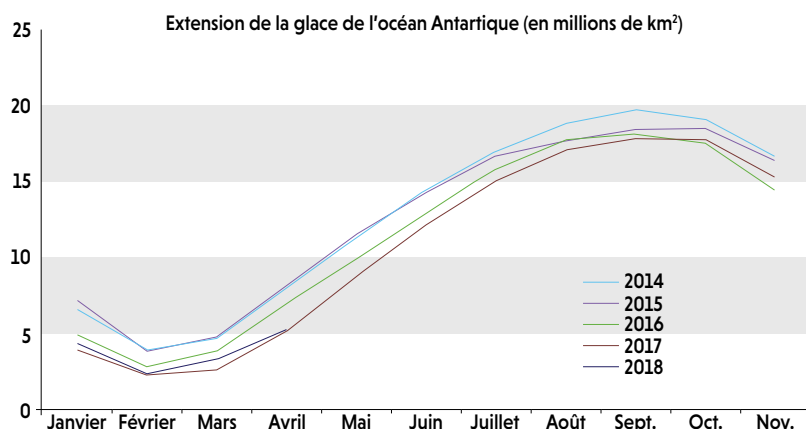
il fallait faire attention à ne pas cogner et endommager la coque du bateau. Ensuite, nous avons foré ces blocs, pour y prélever des carottes de glace uniformes (des cylindres de glace), une manipulation particulièrement acrobatique. Avec le bateau toujours en mouvement et ballotté par une mer parfois hostile, il fallait s'y mettre à plusieurs et tenir la personne réalisant l'opération de forage pour la stabiliser au maximum.

Ensuite, il fallait réaliser le test de torsion qui consiste à exercer une force de torsion sur une carotte de glace suivant l'axe du cylindre. Le matériau est alors soumis à une contrainte de cisaillement qui est nulle au centre du cylindre et maximale sur le bord. Pour une force appliquée donnée (plus précisément un moment de torsion), le cylindre se déforme d'autant plus qu'il est mou et compressible. Et il se casse plus ou moins rapidement en fonction de la déformation. En réalisant ce test sur un grand nombre d'échantillons, nous avons déterminé les caractéristiques mécaniques des crêpes de glace, en particulier le paramètre de fracture.

UNE NOUVELLE APPROCHE NUMÉRIQUE

Forts de ces données, nous les avons utilisées pour modéliser la glace de mer. Or ce matériau n'est pas seulement compressible, il présente, comme les glaciers, des caractéristiques viscoélastiques : à la fois visqueux (un comportement fluide qui résiste à un écoulement) et élastique (comportement solide de déformation réversible sous une contrainte). Les équations (aux dérivées partielles) qui décrivent un matériau présentant ces propriétés sont complexes. Il est donc impossible d'obtenir des solutions exactes et simples qui permettent de décrire le comportement de la glace.

Seul moyen : utiliser des approximations numériques pour résoudre ce type d'équations, comme la méthode des éléments finis, très souvent utilisée pour étudier des matériaux (pour résoudre les équations de diffusion de la chaleur, les équations de Maxwell pour étudier un champ électromagnétique, ou des équations qui décrivent les déformations mécaniques d'un objet). Son principe consiste à diviser l'objet d'étude en un nombre fini de petits volumes, des polyèdres nommés ici éléments finis. Leur petite taille permet alors de faire, dans chacun d'eux, des approximations permettant de résoudre les équations et d'obtenir une solution approchée du problème. Comme il y a un nombre fini de polyèdres, et donc un nombre fini d'équations pour cette approximation, il est possible de résoudre numériquement le problème avec un ordinateur. Il faut cependant s'assurer de la cohérence des résultats, par exemple, en vérifiant la continuité des



L'extension de la glace de mer en Antarctique atteint son minimum en février (la belle saison australe). Entre 2014 et 2018, la quantité de glace tend à diminuer.

résultats d'un polyèdre à ses voisins. Des outils mathématiques quantifient l'erreur maximale commise par l'approximation, même sans connaître la solution exacte. On doit aussi s'assurer que si l'on prenait des polyèdres de plus en plus petits, la solution approchée doit converger vers une solution cohérente.

Jusqu'à présent, les algorithmes utilisés pour étudier une mer de glace calculaient d'abord les déplacements des cristaux de glace dans l'eau à l'aide de la méthode des éléments finis, puis les tensions mécaniques au sein des agglomérations de cristaux étaient reconstruites dans un second temps. Par cette méthode, les approximations dans le calcul des déplacements se reportaient dans l'estimation des tensions, où elles pouvaient vite devenir importantes et fausser le résultat. Or il est clair que ces tensions jouent un rôle important dans la formation de la glace et son évolution.

Nous avons donc développé de nouveaux outils mathématiques qui reposent sur la méthode des moindres carrés, qui consiste à minimiser les erreurs. En outre, notre approche évalue simultanément les tensions et les déplacements dans les équations aux dérivées partielles du problème. Grâce aux données recueillies lors de notre expédition et ces outils, nous avons réalisé une simulation qui décrit comment des cristaux de glace dans la mer évoluent dans un système incluant des vents et des courants marins. Résultat : la modélisation des tensions dans la glace est meilleure que dans les approches précédentes.

Notre modèle reste à enrichir pour se rapprocher le plus possible des conditions réelles. Puis, si le modèle est validé, il restera à travailler avec des climatologues pour voir comment la glace de mer contribue à la dynamique globale dans le contexte du réchauffement climatique. ■

BIBLIOGRAPHIE

F. Bertrand, **Least-squares finite element method for sea-ice dynamics**, en ligne le 5 septembre 2018. <https://arxiv.org/abs/1809.01344>

V. Masson-Delmotte, **La fonte de l'Antarctique s'accélère**, *Pour la Science*, n° 490, août 2018.

A. Orsi, **Mille ans de variations climatiques en Antarctique**, *Pour la Science*, n° 458, décembre 2015.

L'ESSENTIEL

> Les interfaces cerveau-machine, ou ICM, peuvent envoyer ou recevoir des messages vers ou depuis le cerveau.

> Parvenir à un mouvement fluide et rapide d'une prothèse contrôlée par une ICM est toutefois très complexe.

> De nouvelles électrodes, implantées dans les aires du cerveau où naît l'intention du mouvement, permettent à des patients paralysés de contrôler plus finement le mouvement de la prothèse.

L'AUTEUR



RICHARD ANDERSEN
professeur de neurosciences et directeur de l'institut Tianqiao and Chrissy Chen de neurosciences à l'Institut de technologie de Californie, à Pasadena, aux États-Unis

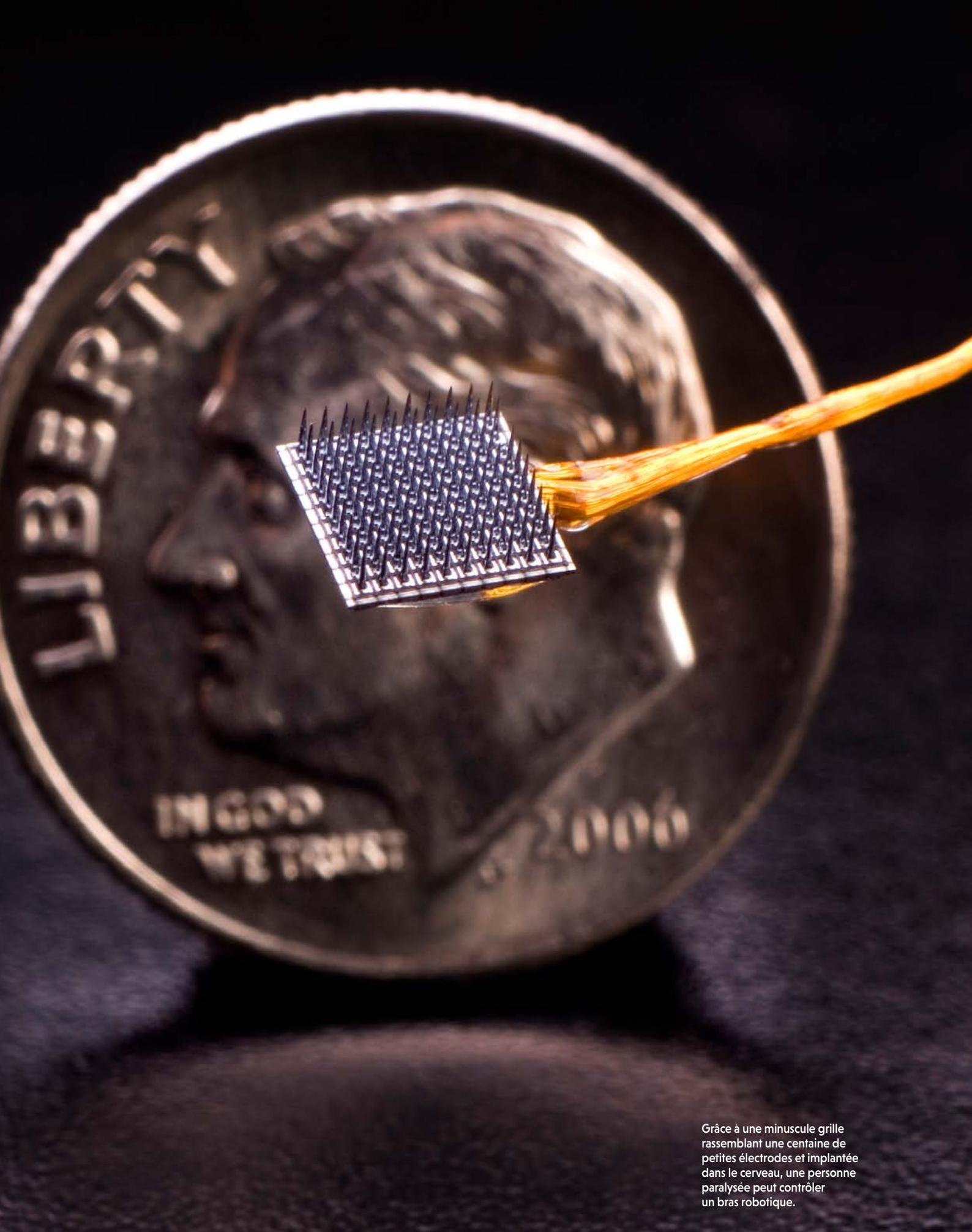
Quand les machines décodent nos intentions

Piloter une prothèse à la seule force de la pensée : c'est ce que permet un implant fiché dans la zone du cerveau qui crée nos intentions.

Un jour de 2014, dans mon laboratoire, Erik Sorto, paralysé après avoir été blessé par balle à l'âge de 21 ans, a utilisé sa pensée, et elle seule, pour boire une bière sans assistance, pour la première fois depuis plus de dix ans. Nous avions implanté en avril 2013 des électrodes dans son cerveau afin de contrôler les signaux nerveux que le cerveau produit pour déclencher les mouvements. Ce jour de 2014, une interface cerveau-machine (ICM) a envoyé un signal nerveux depuis une aire corticale de haut niveau. Un bras électromécanique s'est alors étendu jusqu'à la bouteille, l'a saisie et l'a portée aux lèvres d'Erik. Mes collègues et moi avons assisté, émerveillés, à l'accomplissement de cette tâche, incroyablement

complexe en dépit des apparences. Un chercheur qui partage avec les patients leur joie de pouvoir déplacer un bras robotisé pour interagir avec le monde physique ressent une indéniable satisfaction personnelle.

Cette scène fait aussi naître immédiatement de nombreuses interrogations sur la manière dont des pensées peuvent contrôler une prothèse mécanique. Tous les jours, nous bougeons sans y réfléchir. L'objectif d'une ICM perfectionnée est de parvenir à effectuer ces mouvements avec aisance. À cette fin, des neuroscientifiques tentent depuis des dizaines d'années de décoder les signaux nerveux qui amorcent les gestes comme celui de tendre le bras et saisir un objet. Des avancées réelles, bien que limitées, ont stimulé de nouvelles voies d'exploration de l'activité électrique qui foisonne lorsque les >



Grâce à une minuscule grille rassemblant une centaine de petites électrodes et implantée dans le cerveau, une personne paralysée peut contrôler un bras robotique.

> 86 milliards de neurones de notre cerveau communiquent. La nouvelle génération d'ICM porte en elle la promesse d'une association étroite entre cerveau et prothèse, en ciblant avec une grande précision les zones cérébrales qui sont à l'origine de l'action.

Les ICM peuvent faire deux choses: «lire» les signaux nerveux dans le cerveau et les utiliser pour commander un bras robotisé, ou «écrire» dans le cerveau, en captant des informations dans l'environnement et en les faisant parvenir au cerveau. Les ICM qui «écrivent», appelées *write-in* en anglais, utilisent la stimulation électrique pour transmettre un signal au tissu cérébral. Des applications de cette technologie sont déjà utilisées. C'est le cas des prothèses cochléaires, qui stimulent le nerf auditif pour permettre à des personnes atteintes de surdité d'entendre à nouveau. La stimulation profonde d'une aire cérébrale qui contrôle l'activité motrice, les ganglions de la base, permet de traiter des troubles moteurs comme ceux de la maladie de Parkinson ou le tremblement essentiel. Des appareils qui stimulent la rétine sont en cours d'essais cliniques pour traiter certaines formes de cécité.

DU CERVEAU AU ROBOT

À l'inverse, les ICM de la seconde catégorie, dites *read-out*, qui «lisent» et enregistrent l'activité nerveuse, en sont encore au stade de développement. Il faut d'abord franchir les obstacles de la lecture des signaux nerveux avant que cette technologie de nouvelle génération ne puisse bénéficier aux patients. Des techniques de lecture existent déjà, mais elles sont encore grossières. Certes, l'électroencéphalogramme (EEG) enregistre l'activité de quelques centimètres de tissu cérébral où s'activent plusieurs millions de neurones. Toutefois, il s'agirait plutôt d'enregistrer l'activité de neurones individuels impliqués dans un circuit cérébral unique. L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), quant à elle, est un outil de mesure indirect qui enregistre une augmentation du flux sanguin dans une région active du cerveau. On obtient ainsi des images plus fines que celles des EEG, mais toujours d'assez faible résolution. Les variations de flux sanguin sont des phénomènes lents et les IRMf ne peuvent suivre des changements rapides d'activité dans le cerveau.

L'idéal serait de parvenir à enregistrer l'activité de neurones individuels. Suivre l'évolution de l'activité d'un grand nombre de neurones individuels permet d'obtenir une image très fine de l'activité d'une région bien définie du cerveau. Ces dernières années, l'implantation de fines électrodes a rendu possible ce type d'enregistrement. Les grilles utilisées actuellement sont des surfaces planes de 4 millimètres sur 4 qui comportent 100 électrodes. Ces électrodes, longues de 1 à 1,5 millimètre,

forment une sorte de tapis de clous qui enregistre l'activité de 100 à 200 neurones.

Les signaux captés par ces électrodes sont ensuite transmis à des «décodeurs», qui utilisent des algorithmes mathématiques pour traduire différents schémas d'activation de neurones individuels en un signal qui sert ensuite à piloter un appareil, tel qu'un membre robotisé ou un ordinateur.

Notre laboratoire concentre ses recherches sur les personnes tétraplégiques, donc totalement paralysées après une lésion dans la partie supérieure de la moelle épinière. Nous enregistrons l'activité d'une partie du cortex cérébral, une zone d'environ 3 millimètres d'épaisseur à la périphérie des deux hémisphères du cerveau. Si on le mettait à plat, le cortex de chaque hémisphère atteindrait une surface de 80 000 millimètres carrés. Le nombre d'aires corticales connues en charge du contrôle d'une fonction cérébrale dépasse aujourd'hui 180. Ces zones traitent l'information sensorielle, communiquent avec d'autres régions impliquées dans des fonctions cognitives, prennent des décisions ou envoient l'ordre de déclencher une action.

Une interface cerveau-machine peut interagir avec de nombreuses aires du cortex. Parmi elles, les aires corticales primaires, qui détectent des entrées sensorielles telles que l'angle et l'intensité de la lumière frappant la rétine ou une sensation provenant de la terminaison d'un nerf périphérique. Les ICM peuvent aussi interagir avec les aires associatives hyperconnectées du cortex qui sont spécialisées dans le langage, la reconnaissance des objets, les émotions et le contrôle du processus de décision.

Quelques équipes ont déjà commencé à suivre l'activité de populations de neurones individuels chez des patients paralysés, ce qui leur a permis de piloter une prothèse en laboratoire. Mais il reste à franchir des obstacles majeurs avant que l'on puisse équiper un patient d'une neuroprothèse aussi facilement que d'un pacemaker. Mon équipe s'est spécialisée dans l'étude des aires intercorticales plutôt que dans les aires motrices, étudiées par d'autres. Nous espérons que cela permettra de détecter plus rapidement et précisément le déclenchement des signaux nerveux qui transmettent l'intention d'un patient.

Nous nous concentrons sur le cortex pariétal postérieur, où sont amorcés nos mouvements. Nos travaux chez les singes nous ont permis d'identifier une sous-région du cortex pariétal postérieur, le cortex intrapariétal latéral, qui perçoit notre intention de bouger les yeux. D'autres régions du cortex pariétal postérieur enclenchent les mouvements des membres. Par exemple, la PRR (*parietal reach region*) prépare ceux du bras. Certaines, comme l'aire intrapariétale antérieure, sont impliquées dans la préhension des objets, comme l'a montré une étude



Les interfaces cerveau-machine développées par l'auteur (à gauche) et son équipe ont permis à Erik Sorto (à droite) de bouger un bras robotisé.

menée par Hideo Sakata, à la faculté de médecine de l'université Nihon, au Japon.

Le cortex pariétal postérieur présente plusieurs avantages potentiels pour le contrôle cérébral de robots ou d'ordinateurs. Premièrement, il contrôle les deux bras, alors que le cortex moteur de chaque hémisphère n'active que le membre du côté opposé. Il donne aussi une indication sur le but du mouvement. Chez le singe, quand l'animal fixe son regard sur un objet donné, l'aire s'active immédiatement pour signaler sa position. Le cortex moteur, lui, indique la direction à suivre pour que le membre atteigne l'objet. Connaître le but d'une action motrice permet à l'ICM de la décoder rapidement, en deux ou trois dixièmes de seconde, alors qu'interpréter le signal de trajectoire émis par le cortex moteur peut prendre plus d'une seconde.

Passer d'expériences sur des animaux à des études du cortex pariétal postérieur humain n'a pas été simple. Quinze ans se sont écoulés avant que nous réalisions le premier implant humain. Nous avons d'abord implanté chez des singes sains la même grille d'électrodes que celle que nous voulions implanter chez les patients. Les singes ont rapidement appris à contrôler un ordinateur ou une prothèse.

Pour notre projet sur des volontaires humains, qui a reçu l'agrément des autorités veillant au respect des règles de sécurité et d'éthique dans les structures concernées, nous avons formé une équipe de scientifiques, de cliniciens et de professionnels de la rééducation de l'institut de technologie de Californie (ou Caltech),

de l'université de Californie du Sud, de l'université de Californie à Los Angeles (UCLA), du centre de rééducation Rancho Los Amigos et de l'hôpital et centres de soin Casa Colina.

En première ligne de notre projet, les volontaires sont de réels pionniers, car ils n'ont pas l'assurance d'en retirer un bénéfice. Ils s'engagent pour aider les futurs utilisateurs de cette technologie, qui en bénéficieront une fois qu'elle sera adaptée à un usage quotidien. Pour Erik Sorto, notre premier volontaire, l'implantation chirurgicale a eu lieu en avril 2013 et a été effectuée par les neurochirurgiens Charles Liu et Brian Lee. L'opération s'est déroulée sans problème, puis nous avons dû attendre la cicatrisation avant de pouvoir tester le dispositif.

UN APPRENTISSAGE INTUITIF

Mes collègues du Jet Propulsion Laboratory de la Nasa, qui avaient conçu et lancé des robots à destination de Mars, m'avaient parlé des sept minutes d'angoisse durant lesquelles le vaisseau qui emporte le robot pénètre dans l'atmosphère de la planète avant de se poser à sa surface. Pour moi, ce furent deux longues semaines d'inquiétude, à me demander si les implants allaient fonctionner. Nous connaissions certes le fonctionnement des aires cérébrales similaires chez les primates non humains, mais avec un implant humain, nous entrons en territoire inconnu. Personne n'avait encore tenté un enregistrement à partir d'une population de neurones du cortex pariétal postérieur.

Le premier jour du test, nous avons détecté une activité neuronale et à la fin de la semaine, nous avions suffisamment de signaux pour commencer à déterminer si Erik pourrait contrôler un membre robotisé. L'activité de certains neurones était modifiée lorsqu'Erik imaginait faire pivoter sa main. Sa première tâche a consisté à tourner la main du robot dans différentes directions pour serrer celle d'un étudiant. Il était ravi (et nous aussi), car c'était la première fois qu'il interagissait avec le monde depuis son accident.

Les gens s'interrogent souvent sur le temps nécessaire pour apprendre à se servir d'une interface cerveau-machine. Le principe d'utilisation de la technologie s'est révélé immédiatement compréhensible. Exploiter les signaux d'intention du cerveau pour contrôler le bras robotisé s'est fait simplement et de manière intuitive. En imaginant différentes actions, Erik pouvait voir les enregistrements de neurones individuels de son cortex et les « allumer » ou les « éteindre » à volonté.

Bien maîtriser le contrôle du bras demande plus de temps. Au début de l'étude, nous avons demandé aux participants ce qu'ils aimeraient réaliser en contrôlant un robot. Erik voulait être capable de boire une bière seul, sans avoir à demander l'aide de quiconque. Un défi qu'il ➤

> a relevé au bout d'un an environ, sous les applaudissements et les cris de joie des témoins.

Grâce au concours d'une équipe codirigée par Spencer Kellis, de Caltech, qui comprenait des roboticiens du Laboratoire de physique appliquée de l'université Johns-Hopkins, nous avons croisé les signaux d'intention d'Erik avec la puissance de traitement fournie par la vision artificielle et la robotique intelligente. L'algorithme de vision analyse les données transmises par des caméras et l'intelligence du robot combine le signal d'intention avec des algorithmes pour amorcer le mouvement du bras robotisé. Ces premiers résultats ont ensuite été publiés dans la revue *Science* en 2015.

Erik n'est pas le seul utilisateur de notre technologie. Nancy Smith, qui participe à notre étude depuis quatre ans, est devenue tétraplégique après un accident de voiture il y a une dizaine d'années. Auparavant, elle enseignait l'infographie au lycée et jouait du piano. Notre étude, réalisée sous la direction de Tyson Aflalo, de Caltech, et Nader Pouratian, de l'UCLA, a montré une représentation individuelle détaillée de chaque doigt des deux mains dans le cortex pariétal postérieur de Nancy. En s'appuyant sur la réalité virtuelle, celle-ci pouvait imaginer bouger individuellement les dix doigts d'avatars de mains (une gauche et une droite) présentées sur un écran. En imaginant les mouvements de cinq doigts d'une main, Nancy pouvait jouer des mélodies simples sur un clavier virtuel de piano.

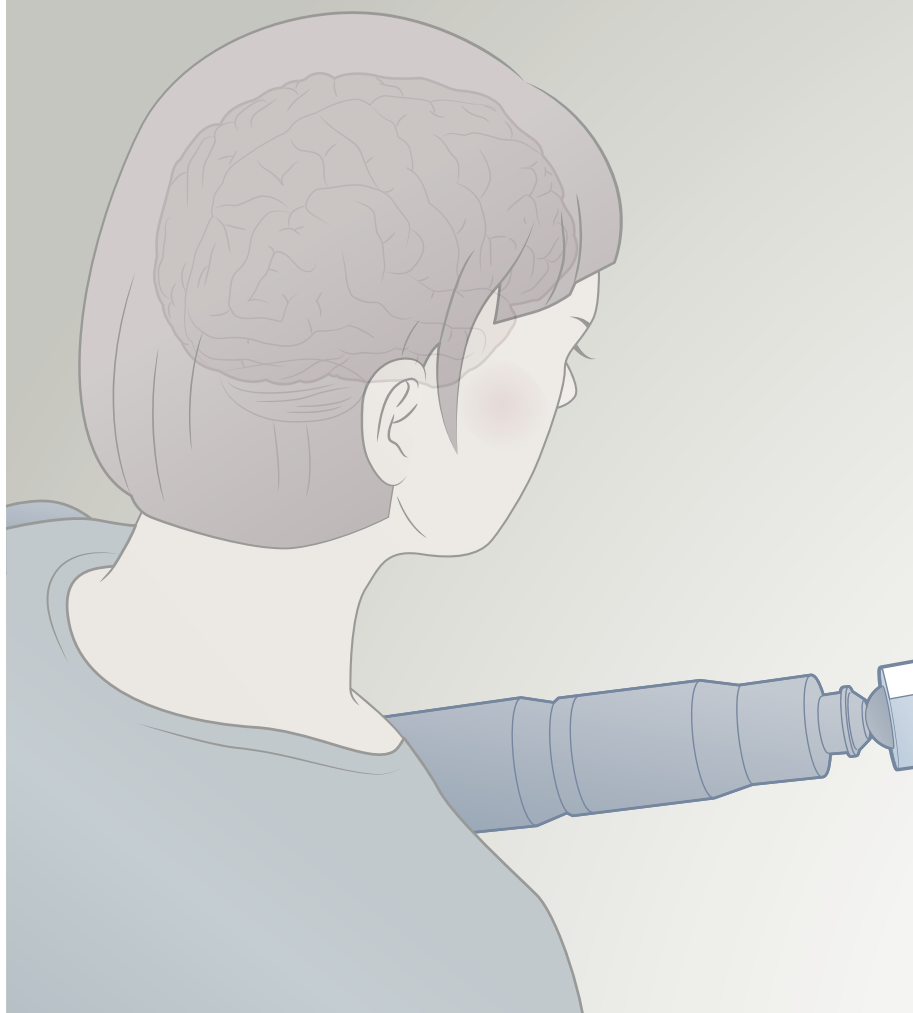
COMMENT LES NEURONES RÉVÈLENT LES INTENTIONS

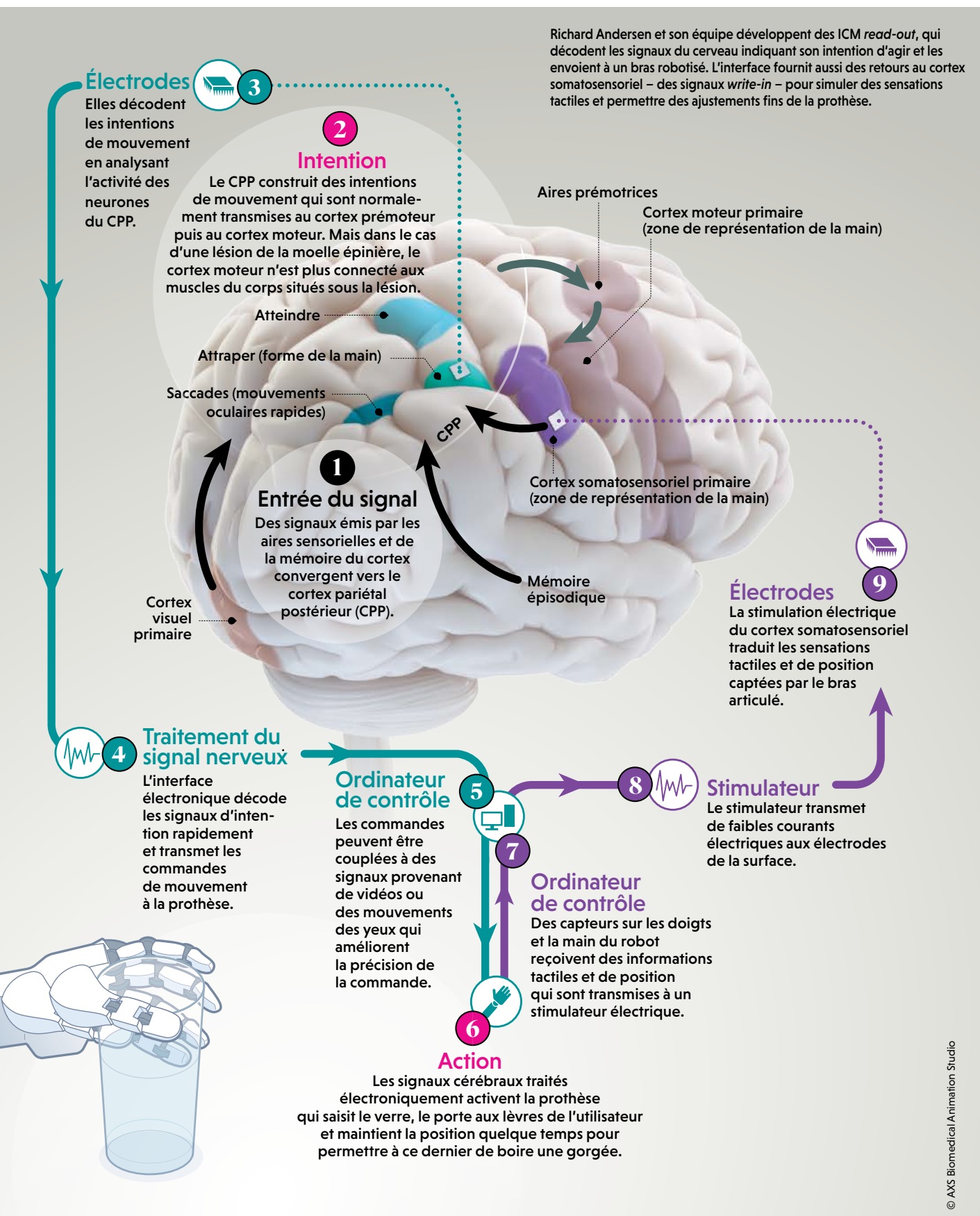
Travailler avec ces patients nous a permis d'étudier les neurones engagés dans le traitement de signaux relatifs aux intentions. La quantité d'informations fournie par les quelques centaines de neurones impliqués s'est révélée colossale. À partir de cela, nous avons réussi à décoder un grand nombre d'activités cognitives, comme établir une stratégie mentale (imaginer des mouvements sans les faire), bouger les doigts, attraper un objet, observer la position des mains pour saisir un objet ou encore réaliser des calculs mathématiques. Étonnamment, implanter quelques minuscules grilles d'électrodes nous a permis de décoder de nombreuses intentions d'une personne.

Quelle quantité d'information peut être enregistrée à partir d'un petit échantillon de tissu cérébral? Cette question me rappelait un problème que j'avais déjà rencontré au début de ma carrière. J'étais alors postdoctorant dans l'équipe de Vernon Mountcastle, à la faculté de médecine Johns-Hopkins, et nous étudions la représentation de l'espace visuel dans le cortex pariétal postérieur de singes. L'œil humain ressemble à une caméra, avec une rétine photosensible qui nous indique la localisation des stimuli visuels. L'image entière est appelée >

À LA FORCE DE LA PENSÉE

Depuis quinze ans, les chercheurs développent des interfaces cerveau-machine (ICM) qui permettent entre autres de contrôler des prothèses grâce à des signaux nerveux. La technologie a progressé lentement, car traduire le signal électrique émis par les neurones en commandes pour bouger un bras robotisé est une opération extrêmement complexe. L'équipe de l'auteur à l'institut de technologie de Californie (Caltech) a tenté d'accélérer le développement des neuroprothèses en se concentrant sur les processus neuronaux complexes, qui amorcent l'action, et en envoyant l'activité électrique correspondante à un bras robotisé. Au lieu d'envoyer les signaux du cortex moteur pour bouger un bras, ces chercheurs ont fait le pari de placer des électrodes dans le cortex pariétal postérieur (CPP), qui transmet à la prothèse les intentions d'agir du cerveau. En effet, utiliser les signaux issus du CPP, c'est-à-dire au plus haut niveau de la chaîne de commande, permet un contrôle plus rapide et plus performant de la prothèse.





> carte rétinotopique. Les neurones sont associés à des zones précises de la rétine, appelées champs récepteurs. Pour d'autres aspects, en revanche, le traitement de la perception visuelle diffère de celui d'un enregistrement vidéo. Quand une caméra balaie une scène, l'image se déplace aussi, alors que lorsque nous bougeons les yeux, le monde paraît stable. C'est que l'image rétinotopique qui provient des yeux est ensuite convertie en une représentation visuelle de l'espace qui tient compte de la position de ce que nos yeux observent, de sorte que lorsque nous les bougeons, le monde ne semble pas se déplacer.

Le cortex pariétal postérieur est un centre de traitement majeur des données visuospatiales. S'il est endommagé, il devient très difficile d'atteindre ou saisir un objet. Au laboratoire de Vernon Mountcastle, nous avons montré que des neurones individuels de cette zone ont des champs récepteurs qui enregistrent une partie de la scène. Les mêmes cellules enregistrent aussi des informations sur la position des yeux. Ces deux signaux interagissent en croisant les données visuelles avec celles de la direction du regard. Le produit des deux est appelé champ de gain.

J'ai continué à m'intéresser à la représentation cérébrale de l'espace quand j'ai pris mon premier poste à l'institut Salk d'études biologiques. Avec David Zipser, un neuroscientifique théoricien de l'université de Californie à San Diego, nous avons décrit dans la revue *Nature* un modèle computationnel de réseau de neurones artificiels qui combine l'activation de certaines zones rétinotopiques avec la direction du regard pour créer des cartes de l'espace indépendantes du mouvement des yeux. Durant la phase d'entraînement des réseaux de neurones, les couches intermédiaires développent des champs de gain, comme dans les expériences avec le cortex pariétal postérieur. En combinant les signaux des données visuelles et de la position des yeux dans les mêmes neurones, nous avons découvert que neuf neurones suffisent à représenter l'intégralité du champ visuel.

Récemment, cette idée de représentations combinées – des populations de neurones qui réagissent à des variables multiples (comme dans les champs de gain) – a suscité un vif intérêt.

Ces travaux pourraient en outre expliquer ce qui se passe dans le cortex pariétal postérieur. Un jour, nous avons demandé à Nancy, en utilisant un ensemble d'instructions écrites, de réaliser huit combinaisons différentes d'une tâche. L'une d'elles nécessitait d'élaborer des stratégies pour imaginer ou réaliser une action. Une autre, d'utiliser la partie droite ou gauche du corps. Une troisième, de s'entraîner à serrer la main de quelqu'un ou de hausser une épaule. Nous avons découvert que les neurones du



Une neuroprothèse doit émettre des signaux du cerveau vers la machine, et inversement



cortex pariétal postérieur combinent toutes ces données et que leur intégration présente un schéma d'activité bien précis, différent de la façon dont ces variations interagissent au hasard dans les expériences réalisées avec des animaux de laboratoire.

LA SÉLECTIVITÉ COMBINÉE DES NEURONES

L'activité des populations de neurones servant à élaborer des stratégies et celle utilisée pour contrôler chaque côté du corps ont tendance à se chevaucher. Si un neurone s'allume pour amorcer un mouvement de la main gauche, il est probable qu'il s'active aussi pour amorcer un mouvement de la main droite, alors que les groupes de neurones qui contrôlent l'épaule ou la main sont plus indépendants. On parle de sélectivité partiellement combinée. Nous avons depuis découvert des similitudes dans des représentations partiellement combinées qui pourraient constituer une sémantique du mouvement.

L'activité des cellules activées pour le même type d'action tend aussi à se chevaucher. Un neurone qui s'allume devant la vidéo d'une personne en train de saisir un objet s'allumera aussi probablement à la lecture du mot « saisir ». Les cellules qui répondent à une action comme celle de pousser, elles, ont tendance à être regroupées au sein du même groupe. En général, le codage partiellement combiné est mis en jeu pour les fonctions qui se ressemblent (les mouvements de la main gauche sont similaires à ceux de la main droite). Il sépare aussi celles qui montrent différentes formes de traitement neuronal (un mouvement de l'épaule diffère d'un mouvement de la main).

Les codages combinés et partiellement combinés ont été mis en évidence dans certaines zones du cortex associatif. Des études seront nécessaires pour savoir s'ils apparaissent aussi

dans les zones qui gouvernent le langage, la reconnaissance des objets et les fonctions exécutives. Nous aimerions aussi savoir si l'aire sensorielle primaire et l'aire corticale motrice utilisent les mêmes structures partiellement combinées.

Un autre objectif à court terme est de découvrir dans quelle mesure les nouveaux apprentissages peuvent affecter les performances des volontaires qui utilisent la prothèse. Si l'apprentissage se fait facilement, n'importe quelle aire cérébrale pourrait être implantée d'électrodes et entraînée pour n'importe quelle tâche réalisée par une interface cerveau-machine. Un implant dans le cortex visuel primaire pourrait ainsi apprendre à contrôler des tâches non visuelles. Mais si l'apprentissage est plus limité, un implant, posé par exemple dans une aire motrice, ne pourrait être entraîné que pour des tâches motrices. De premiers résultats suggèrent, de façon générale, qu'un implant devrait être placé dans la zone qui a été préalablement identifiée comme contrôlant l'activité cognitive ciblée.

Une ICM doit savoir faire plus que recevoir et traiter des signaux cérébraux. Elle doit aussi envoyer un retour depuis la prothèse vers le cerveau. Quand nous tentons de saisir un objet, le retour visuel aide à guider la main vers la cible. La position de la main dépend de la forme de l'objet. Si la main ne reçoit pas d'informations tactiles ou de position du membre lorsqu'il commence à manipuler l'objet, les performances se dégradent rapidement.

Il est fondamental de pallier ce manque pour nos volontaires qui ont subi une lésion de la moelle épinière et qui non seulement ne peuvent plus bouger les parties inférieures de leur corps mais ne peuvent non plus percevoir de sensation tactile, ni la position de leur corps dans l'espace, autant d'éléments essentiels à un mouvement fluide. Une neuroprothèse doit donc être à même de compenser cette perte en émettant des signaux dans les deux directions : du cerveau vers la machine, pour transmettre l'intention du volontaire, et de la machine vers le cerveau, pour lui fournir les informations tactiles et de position captées par le membre robotisé.

Robert Gaunt et ses collègues de l'université de Pittsburg se sont attaqués à ce problème en implantant, chez une personne tétraplégique, une série de microélectrodes dans le cortex somatosensoriel, une région où sont traitées les informations tactiles qui proviennent des membres. Les chercheurs ont ensuite envoyé un courant électrique faible à travers ces microélectrodes et le sujet a ressenti des sensations à la surface de sa main.

À notre tour, nous avons utilisé des implants dans la zone du cortex somatosensoriel recevant les sensations du bras. Nous avons été agréablement surpris de constater que le

patient a perçu des sensations naturelles de pression, de tapotement et de vibrations sur la peau. Il a également senti son bras bouger – sensation qui correspond à la proprioception. Ces expériences montrent que les personnes qui ont perdu les sensations de leurs membres peuvent les recouvrer grâce à des ICM qui les impriment dans leur cerveau. La prochaine étape consistera à utiliser des mains de robot bardées de capteurs pour voir si le retour somatosensoriel améliore la dextérité du membre robotisé sous le contrôle du cerveau. Nous aimerions aussi savoir si les sujets ressentent une impression d'intégration, comme si le bras robotisé devenait une partie de leur corps.

AMÉLIORER LES ÉLECTRODES

Un autre défi majeur consiste à améliorer la capacité des électrodes à envoyer et à recevoir des signaux nerveux. Nous avons découvert que les implants fonctionnent pendant cinq ans environ. Cependant, avec de meilleures électrodes, on pourrait accroître la longévité de ces systèmes et augmenter le nombre de neurones associés. L'augmentation de la longueur des électrodes, qui est une autre priorité, permettrait d'atteindre des zones situées dans les replis du cortex.

Par ailleurs, avec des électrodes flexibles, qui suivent les légers déplacements du cerveau, dus par exemple à des variations de la tension artérielle, la stabilité des enregistrements s'améliorera. Aujourd'hui, il faut parfois recalibrer le décodeur, car il arrive que les électrodes rigides se décalent légèrement par rapport aux neurones d'un jour à l'autre, alors que l'on aimerait suivre l'activité de populations identiques de neurones sur plusieurs semaines, voire plusieurs mois.

Enfin, les implants doivent être miniaturisés, fonctionner à faible puissance (pour ne pas avoir à chauffer le cerveau) et sans fil, pour éviter d'avoir à relier l'outil au tissu cérébral. L'implantation de toutes les interfaces actuelles nécessite une opération chirurgicale. Mais nous espérons qu'un jour seront mises au point des interfaces d'enregistrement et de stimulation capables d'envoyer et de recevoir des signaux à travers le crâne avec des performances égales à celles des électrodes actuelles implantées chirurgicalement.

Ce n'est qu'à ce moment-là, lorsque nous aurons mis au point des techniques non invasives, capables de détecter avec précision l'activité de neurones individuels, qu'une amélioration sera atteinte. Les ICM, élaborées dans l'objectif d'aider les personnes paralysées, atteindront-elles un jour le niveau de la technologie fantasmée par les livres de science-fiction, les films et les médias, qui serait utilisée pour améliorer l'humain et lui conférer des «superpouvoirs» lui permettant de courir plus vite et sauter plus haut ? À l'heure actuelle, nous en sommes encore loin. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Armenta Salas et al., **Proprioceptive and cutaneous sensations in humans elicited by intracortical microstimulation**, *eLife*, vol. 7, article e32904, 2018.

S. Flesher et al., **Intracortical microstimulation of human somatosensory cortex**, *Science Translational Medicine*, vol. 8, article 361ra141, 2016.

T. Aflalo et al., **Decoding motor imagery from the posterior parietal cortex of a tetraplegic human**, *Science*, vol. 348, pp. 906-910, 2015.

L. Hochberg et al., **Reach and grasp by people with tetraplegia using a neurally controlled robotic arm**, *Nature*, vol. 485, pp. 372-75, 2012.

R

ENDEZ-VOUS

P.80 Logique & calcul
 P.86 Art & science
 P.88 Idées de physique
 P.92 Chroniques de l'évolution
 P.96 Science & gastronomie
 P.98 À picorer

DES TROUS À ENTOURER AVEC PARCIMONIE

Laisser des trous dans un assemblage de carrés en minimisant le nombre de pièces utilisées: ce problème de géométrie n'est pas facile. Mais le cheminement vers sa solution illustre bien la démarche des mathématiciens.

L'AUTEUR



JEAN-PAUL DELAHAYE
 professeur émérite
 à l'université de Lille
 et chercheur au Centre
 de recherche en
 informatique, signal
 et automatique de Lille
 (Cristal)



Jean-Paul Delahaye a notamment publié : **Les Mathématiciens se plient au jeu**, une sélection de ses chroniques parues dans *Pour la Science* (Belin, 2017).

Le tâtonnement et la construction progressive de la solution d'une énigme géométrique d'apparence simple sont les sujets de cette rubrique. L'objectif est d'illustrer les diverses étapes qu'un mathématicien doit franchir pour comprendre un problème, et l'intérêt de passer de la découverte d'une solution dont on vérifie la justesse à la certitude qui ne s'obtient qu'en élaborant une démonstration. Ainsi, le travail de recherche comporte plusieurs phases plus ou moins entremêlées :

- a) La prise de contact avec le problème, sa formulation claire et le traitement de quelques cas particuliers.
 - b) La prise de conscience des difficultés et l'approfondissement de l'exploration, conduisant à la découverte de régularités et à la formulation d'hypothèses.
 - c) La mise au point d'une réponse vraisemblable accompagnée de quelques calculs pour formuler la solution.
 - d) L'élaboration d'une démonstration complète, nécessitant une compréhension approfondie du problème et l'introduction d'idées nouvelles. Lors de cette phase, on démontre parfois des résultats intéressants, au-delà de la question initiale.
 - e) La formulation d'autres problèmes proches que la méthode trouvée permet de traiter, ou qui sont liés mais demanderaient un travail nouveau.
- Nous nous intéresserons aux formes du plan composées de pièces carrées de côté

unitaire, posées côté contre côté que nous dénommerons ici « formes » (voir l'encadré 1).

Posons-nous la question: pour un entier n donné, combien faut-il au minimum de carrés pour assembler une forme présentant n trous? Nous noterons $f(n)$ ce nombre minimal.

Pour que le problème soit bien défini, précisons que des trous distincts ne doivent pas se toucher, et que seuls comptent les trous totalement entourés de carrés. Nous pourrions adopter d'autres conventions, mais elles définiraient d'autres problèmes.

EXPÉRIMENTATION

La première chose à faire est de résoudre le problème pour les petites valeurs de n . Pour $n=1$, $n=2$ et $n=3$, c'est simple. Il est clair que l'on ne peut pas faire mieux que les formes dessinées sur les figures 2a, 2b, 2c. On a donc $f(1)=8$, $f(2)=13$, $f(3)=18$. Remarquons que pour $n=3$, il y a trois figures différentes de 18 carrés comportant trois trous.

Ces premiers cas pourraient suggérer que l'on a, pour tout entier n , $f(n+1)=f(n)+5$. Avec $f(1)=8$, cela conduirait à la formule générale $f(n)=3+5n$ et donc à $f(4)=23$. C'est faux! Il semble plutôt que $f(4)=21$ (voir la figure 2f).

Pour $n=4$, on gagne quelque chose en renonçant à aligner les trous. Pour $n=5$ et 6, il n'est pas possible de faire mieux que 26 et 29.

Pour $n=5$, il faut à nouveau ajouter 5 au résultat précédent ($f(5)=26$), mais pour $n=6$, il suffit d'ajouter 3, puisque $f(6)=29$. La règle semble obscure: parfois on doit ajouter 3 au résultat précédent, parfois il faut ajouter 5.