

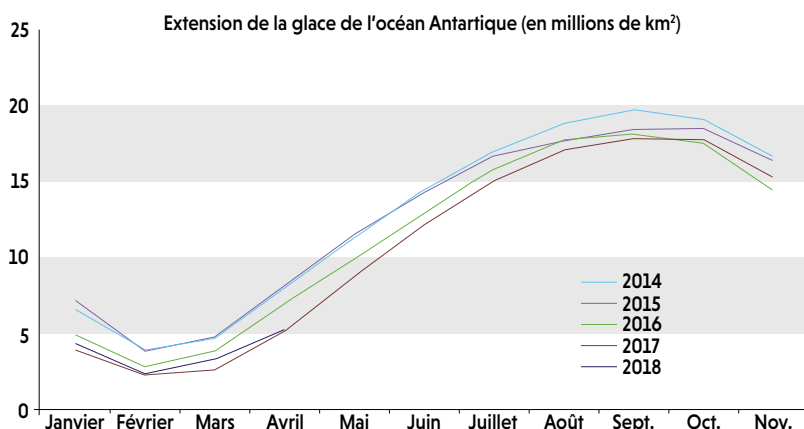
il fallait faire attention à ne pas cogner et endommager la coque du bateau. Ensuite, nous avons foré ces blocs, pour y prélever des carottes de glace uniformes (des cylindres de glace), une manipulation particulièrement acrobatique. Avec le bateau toujours en mouvement et ballotté par une mer parfois 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

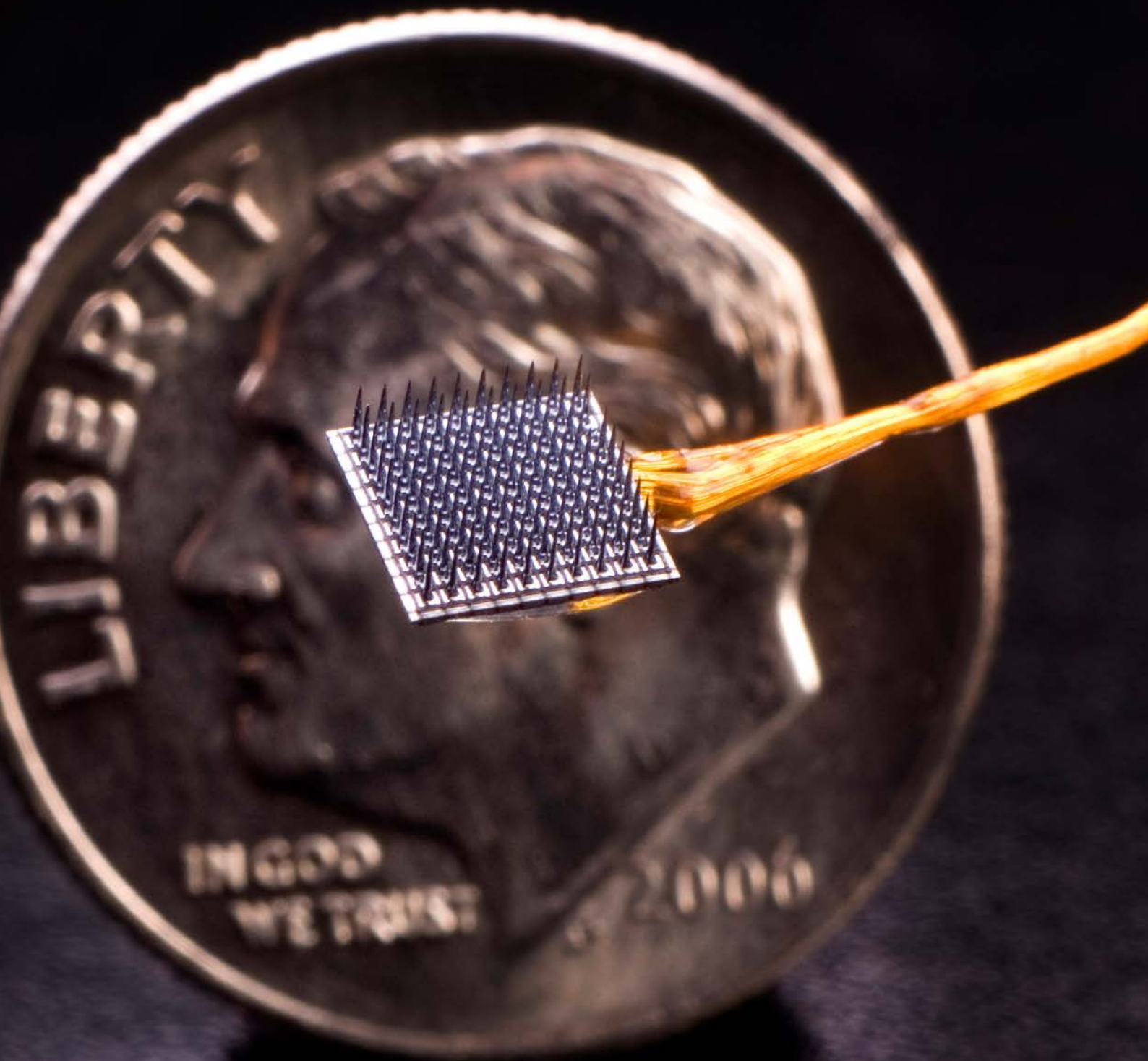
Quand les machines décodent nos intentions

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