



On voit ici un dispositif de conservation, en cours de manipulation pour déplacer un échantillon provenant de la mission Apollo 15 depuis son armoire de rangement sous azote vers un conteneur en acier inoxydable.

> les bords extérieurs de certains grains du sol, ce qui assombrit leurs surfaces avec le temps. Nous savons aujourd'hui que le rayonnement solaire, les grandes fluctuations de température et le bombardement constant par de minuscules micrométéorites contribuent tous à l'érosion spatiale.

DES ÉCHANTILLONS POUR L'AVENIR

La période actuelle de la science lunaire est passionnante: cette année, des échantillons préservés depuis leur collecte sur la Lune et faisant partie de ceux que la Nasa a intentionnellement mis de côté, dans l'attente de techniques d'analyse plus performantes que celles de l'ère *Apollo*, seront mis à disposition des chercheurs. En mars, neuf équipes de chercheurs ont ainsi été sélectionnées pour recevoir des échantillons d'*Apollo 15*, *16* et *17* non ouverts et scellés sous vide. Cette étape du programme ANGSA (*Apollo Next Generation Sample Analysis*) devrait conduire à de nouvelles connaissances sur la formation et l'évolution de notre satellite.

Si nous avons beaucoup appris des échantillons et des expériences de surface d'*Apollo*, nous avons aussi un grand besoin de nouveaux échantillons. Nous n'avons ainsi aucune roche issue de la face cachée de la Lune, de ses régions polaires ou encore de son intérieur profond. Deux types d'échantillons dont j'aimerais particulièrement disposer seraient de la glace d'un cratère polaire et des roches issues du bassin d'Aitken, sur la face cachée, qui recouvre le pôle Sud et constitue le plus grand cratère d'impact de la Lune. Son intérieur

pourrait contenir des matériaux provenant de la partie inférieure de la croûte lunaire et même de son manteau rocheux (la couche sous-jacente à la croûte). L'étude du bassin Aitken du pôle Sud nous aiderait à comprendre pourquoi de très grands bassins façonnent les surfaces et les intérieurs des corps planétaires. Disposer d'un échantillon de glace polaire lunaire nous renseignerait sur l'âge et l'origine de l'eau lunaire – ce qui pourrait aider à clarifier ceux de l'eau de la Terre.

De tels échantillons pourraient provenir tant de missions habitées que de missions robotisées: aucun consensus n'existe entre planétologues sur le caractère préférable de l'un ou l'autre type de mission. De nombreux experts soutiennent, à juste titre, que les missions robotisées sont moins coûteuses, plus sûres et peuvent durer plus longtemps que les missions humaines. Pour autant, les humains sont plus à même que les robots de prélever la plus grande variété possible de spécimens inhabituels, ce dont témoignent la diversité des origines géologiques de la composition et des âges des échantillons d'*Apollo*.

Le programme *Apollo* reste un accomplissement sans pareil. Alors que nous célébrons le 50^e anniversaire du «grand pas pour l'humanité» de Niels Armstrong, le premier astronaute sur la Lune, aucun humain n'a, depuis Harrison «Jack» Schmitt et feu Gene Cernan de la mission *Apollo 17* de décembre 1972, foulé un autre corps planétaire. En tant que chercheuse profondément inspirée par le programme *Apollo*, je travaille activement à créer un nouvel «élan *Apollo*» afin que nous puissions enfin revoir des humains explorer l'inconnu. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. J. Lock et al., **The origin of the Moon within a terrestrial synestia**, *JGR Planets*, vol. 123(4), pp. 910-951, 2018.

M. Laneuville, **La Lune, une histoire pleine de surprises**, *Pour la Science*, n° 466, pp. 26-35, août 2016.

R. Canup, **Forming a Moon with an Earth-like composition via a giant impact**, *Science*, vol. 338, pp. 1052-1055, 2012.

M. Čuk et al., **Tidal evolution of the Moon from a high-obliquity, high-angular-momentum Earth**, *Nature*, vol. 539, pp. 402-406, 2016.

L'ESSENTIEL

> La glace de mer réfléchit une part importante du rayonnement solaire qui arrive sur la Terre et contribue ainsi à la régulation de la température de la planète.

> Les propriétés de cette glace sont mal connues. Or ces données sont nécessaires pour la modéliser de façon réaliste.

> En 2017, lors d'une expédition dans l'océan Antarctique, les chercheurs ont réalisé des prélèvements de glace (dont la forme rappelle celle des crêpes) et ont mesuré ses propriétés mécaniques.

> Ils ont ensuite développé un modèle numérique de la glace de mer.

LES AUTEURS



**FLEURIANNE
BERTRAND**
professeure
à l'université
de Berlin



TIM RICKEN
professeur
à l'université
de Stuttgart

La pêche à la crêpe de glace

Lors d'une expédition dans l'océan Antarctique, des chercheurs sont partis « pêcher » des crêpes de glace. Leur objectif : mesurer leurs propriétés pour les intégrer de façon plus réaliste dans les modèles climatiques.

Ballotté par des vagues gigantesques (jusqu'à plus de 14 mètres) et des vents soufflant à plus de 100 kilomètres par heure, le brise-glace *SA Agulhas II* était mis à rude épreuve. Nous avons appareillé au Cap, en Afrique du Sud, le 28 juin 2017, et nous progressions alors avec une visibilité réduite vers notre destination : l'océan Antarctique. Si cette période correspond à la saison chaude et agréable dans l'hémisphère Nord, il en est tout autrement dans l'hémisphère Sud où les saisons sont inversées. Mais pourquoi partir vers l'Antarctique à une période aussi inhospitalière ? Parce que notre but était d'étudier la glace de mer, qui ne se forme que pendant la saison la plus froide.

Malgré le confort du navire presque neuf, la vie à bord était loin d'être facile. Les brise-glace, avec leur proue arrondie, subissent bien plus fortement que les autres bateaux les chocs qui se produisent quand, après avoir été soulevés par une vague, ils retombent lourdement sur l'eau (voir la photo page 68). Ce phénomène de *slamming*, très éprouvant pour l'organisme,

donne la sensation d'être en permanence sur des montagnes russes. Ainsi, une bonne part de l'équipe (environ 50 scientifiques et 44 membres d'équipage) a souffert du mal de mer et a laissé les plus résistants assumer la surcharge de travail. Pourtant, malgré la fatigue et le mauvais temps, nous avons gardé le moral, motivés par nos projets de recherche dans le cadre de cette expédition soutenue par la fondation nationale sud-africaine pour la recherche.

L'Antarctique, l'une des régions de la Terre les plus difficiles d'accès, en particulier durant cette saison, a fait l'objet de moins de travaux de recherche que les autres parties du globe. D'où l'intérêt de cette mission qui embarque des spécialistes de diverses disciplines : des biologistes étudiant le phytoplancton, des climatologues s'intéressant au cycle de l'azote, de l'ammoniac ou du dioxyde de carbone, des ornithologues répertoriant les espèces d'oiseaux, etc. Dans notre cas, nous nous intéressons à la glace de mer et à ses propriétés.

Cette glace se forme à partir de cristaux qui se constituent dans l'eau de mer et s'agglomèrent pour former des blocs. Puis, à force de >



L'océan Antarctique couvert de glace en crêpe pendant une rare accalmie. Cette glace en mer a un rôle important dans la dynamique climatique de la planète.

> chocs répétés, ces larges morceaux de glace se remodelent avec des bords plus épais, et prennent une forme quasi circulaire, de 30 centimètres à 3 mètres de diamètre, d'où leur nom de *pancakes* en anglais, de *blinis* en russe ou de crêpes de glace (voir la photo page 67 et ci-contre).

Cette glace de mer contribue à la cryosphère, la partie du globe qui est recouverte par de la neige ou de la glace. Ces régions réfléchissent vers l'espace plus de 70% du rayonnement solaire qu'elles reçoivent. Ce pouvoir réfléchissant, c'est-à-dire le rapport de l'énergie réfléchie à l'énergie lumineuse incidente est nommé l'albédo. Par comparaison, l'albédo de la mer est de seulement 10%, de 10 à 25% pour la végétation, de 10 à 20% pour la roche, etc. L'albédo moyen de la Terre, toutes surfaces confondues est de 30%. En renvoyant de façon efficace le rayonnement solaire, la cryosphère contribue à réguler la température de la planète. L'albédo influe aussi sur la météo, c'est-à-dire sur les variations à court terme des conditions atmosphériques: comme il influe sur l'ensoleillement reçu, il contribue au gradient thermique qui agit sur la circulation générale de l'atmosphère.

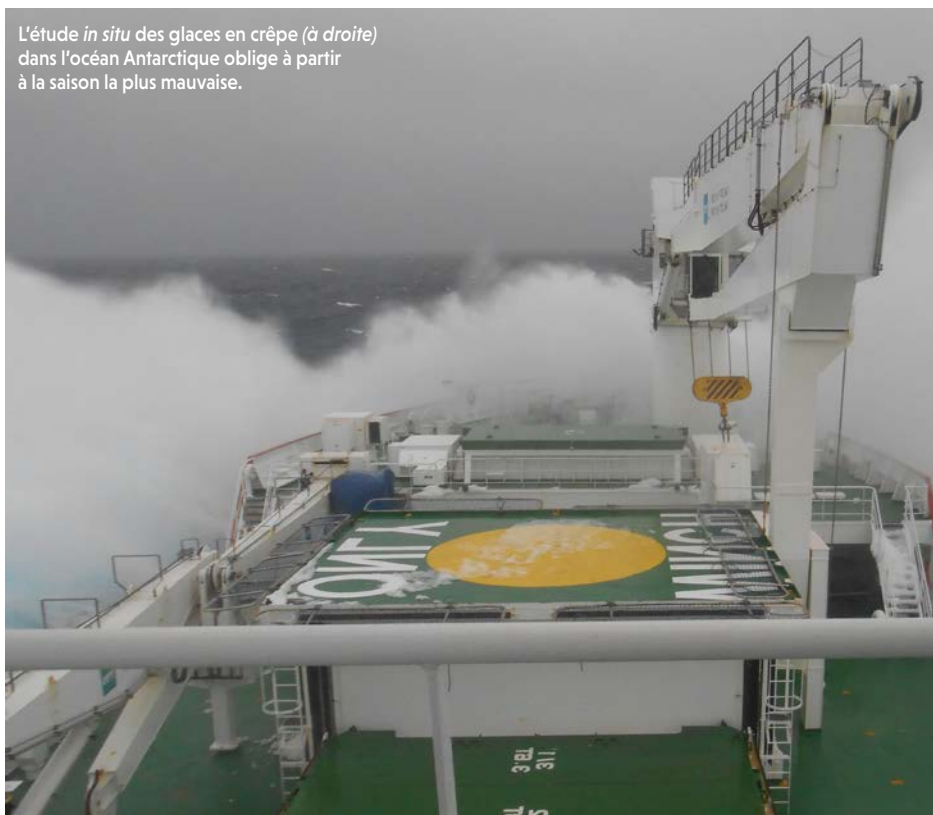
UN RÔLE IMPORTANT DANS LE CLIMAT ET LA MÉTÉO

Pour produire des prévisions météorologiques (à court terme) ou climatique (à long terme) les plus fiables possible, les modèles numériques doivent intégrer une description la plus précise possible de la cryosphère: quelles régions sont couvertes par de la neige et de la glace et à quelle période de l'année? La réponse est complexe car elle varie d'une région à une autre et présente une forte dépendance saisonnière. En moyenne, les surfaces englacées ou enneigées représentent, entre 40 et 85 millions de kilomètres carrés, soit entre 7 et 17% de la surface de la Terre.

Certaines de ces surfaces sont étudiées depuis longtemps, c'est le cas des glaciers. À partir des années 1950, les climatologues ont commencé à s'intéresser à la banquise arctique, aux calottes polaires (du Groenland et de l'Antarctique) et aux pergélisols (des sols gelés de façon permanente). L'étude de la glace de mer a commencé plus récemment, et les propriétés mécaniques de cette vaste couche de glace, très peu étudiée *in situ*, restent encore assez méconnues. Les données sont d'autant plus lacunaires que la glace n'est que rarement permanente et a une évolution saisonnière importante: l'Antarctique perd quasiment toute sa glace de mer pendant la belle saison (l'été austral, c'est-à-dire de décembre à février), tandis que l'Arctique voit sa superficie réduite de moitié entre l'été et l'hiver.

La glace de mer se forme à partir de février en Antarctique et fond dès le mois d'octobre.

L'étude *in situ* des glaces en crêpe (à droite) dans l'océan Antarctique oblige à partir à la saison la plus mauvaise.



À l'inverse, elle se forme à partir d'octobre en Arctique. Ainsi, on estime qu'il y a toujours au moins 19 millions de kilomètres carrés d'océans couverts par de la glace de mer, avec un pic à 27 millions de kilomètres carrés en novembre chaque année.

Cependant, dans le contexte du réchauffement climatique, ces valeurs moyennes évoluent à la baisse. On observe par exemple que, depuis 2015, l'extension maximale de la glace en Arctique a été environ 10% moins importante que la valeur moyenne calculée entre 1981 et 2010, soit près de 1,2 million de kilomètres carrés (environ deux fois la superficie de la France). De la même façon, avec environ 6 millions de kilomètres carrés, l'extension minimale (en septembre, à la fin de l'été) est 25% plus faible que ce qu'elle a été. On observe des tendances similaires en Antarctique (voir la figure page 71).

Il existe cependant une différence majeure entre l'océan Arctique et l'Antarctique, qui influe sur la formation de la glace de mer. Le premier est un océan quasi fermé, entouré de terres proches, tandis que le second est ouvert. Cela implique que les courants sont plus faibles pour l'Arctique que dans l'océan austral: la glace de mer s'agglomère plus facilement et les blocs formés se fixent les uns aux autres. La modélisation de son expansion est alors simplifiée. Par ailleurs, la proximité des côtes a facilité l'étude de la glace de mer arctique, qui a débuté dans les années 1950 et qui était aussi



motivée par son impact sur l'économie (le passage des bateaux, l'accès à certaines ressources sous-marines de gisements de gaz et de pétrole). En revanche, l'étude de la glace de mer en Antarctique n'était pas une priorité, pour trois raisons principales. D'abord, sa présence n'était pas un obstacle pour les routes maritimes. Ensuite, la région est très difficile d'accès, surtout pendant la mauvaise saison, justement quand la glace se forme. Enfin, on a longtemps pensé que cette glace avait des propriétés semblables à celle de l'Arctique. En réalité, les différences sont importantes car la glace de mer en Antarctique est exposée à des vents et des courants marins bien plus forts. Ces mouvements influent le processus de

formation de la glace en mer, et donc sur certaines caractéristiques comme la densité ou la porosité et donc sur sa résistance mécanique. Ainsi, si ces crêpes sont poussés par le vent vers les côtes, elles s'y accumulent et sous la pression finissent par se briser. Ce phénomène de fracturation participe à la dynamique globale de la glace de mer. Mais, comment la résistance aux forces mécaniques varie-t-elle exactement entre la glace arctique et antarctique?

Avec la prise de conscience du dérèglement climatique récent, les travaux de modélisation en Antarctique ont sérieusement commencé. La recherche a d'abord concerné l'inlandsis de l'Antarctique (environ 14 millions de kilomètres carrés autour du pôle Sud), c'est-à-dire la glace recouvrant la terre ferme, puis les travaux se sont étendus au cas de la glace de mer.

Cette dernière est aujourd'hui intégrée dans les modèles climatiques mais de façon très simplifiée. En 2008, Ron Kwok, à l'institut de technologie de Californie, et ses collègues ont montré qu'il y avait des différences significatives entre les simulations de glace de mer et les observations par satellite. Il n'était cependant pas clair si ces problèmes venaient d'une modélisation imparfaite de la glace ou des approximations numériques des simulations. Nous manquons de données sur les propriétés de ces crêpes de glace pour en établir une représentation plus réaliste. Il y avait donc un besoin manifeste de mesurer les ➤

■ ■
**À l'échelle du globe,
la glace de mer recouvre
entre 19 et 27 millions
de kilomètres carrés**
■ ■



> caractéristiques de la glace de mer *in situ*, de développer une représentation fiable de ce matériau et de réexaminer les simulations numériques. C'est ce qui a motivé notre participation à l'expédition dans l'océan Antarctique en 2017.

Durant le voyage, un premier volet de recherche sur la glace de mer a concerné les images satellitaires et leur interprétation. Les climatologues utilisent ces images prises de l'espace pour estimer la quantité de glace de mer présente à tout moment. Cependant, nous n'avions que des correspondances approximatives entre l'état réel de la glace (sa densité ou la taille moyenne des crêpes) et les niveaux de gris sur les océans des images satellitaires. Pour y remédier, lors de notre expédition, il y avait en permanence deux personnes sur la plateforme d'observation du bateau pour recenser la glace de mer. Des caméras filmaient aussi l'océan, et une personne était chargée de changer les batteries toutes les heures, car leur autonomie est drastiquement réduite à cause du froid (avec des températures ressenties d'environ -20°C) : une opération très dangereuse, avec un risque non négligeable d'être emporté par-dessus bord à cause d'une vague déferlante ! Ce travail d'observation de la glace de mer a permis d'améliorer l'interprétation des données satellites qui sont ensuite exploitées dans les modèles prévisionnels.

Notre équipe s'est aussi appliquée à mesurer les propriétés de la glace de mer,

notamment sa compressibilité et sa résistance aux forces de torsion. En effet, parce qu'elle se forme en agglomérant des cristaux de glace, la crêpe de glace est poreuse, c'est-à-dire qu'elle présente des pores contenant soit de l'eau, soit de l'air. Dès lors, le matériau est compressible. Sous l'effet d'une force, les cristaux se réarrangent et combler les pores dans un premier temps. Le bloc de glace se déforme. Mais si la force continue d'être appliquée, il se brise. Nous voulions modéliser de façon réaliste la structure de la crêpe de glace et son comportement.

Pour cela, nous avons d'abord « pêché » des crêpes à l'aide d'un panier suspendu à une grue, une opération délicate qui a nécessité de nombreuses tentatives et plusieurs nuits afin de collecter assez de glace : malgré la mer agitée,

Pour déposer des bouées afin de suivre la dérive de la glace en fonction des courants marins ou faire des prélèvements, les chercheurs descendent du navire grâce à une grue (à gauche). Les carottes de glace sont analysées directement sur le bateau dans des conditions de stabilité qui ne sont pas toujours idéales (à droite).

À la fois compressible et viscoélastique, la glace est difficile à modéliser

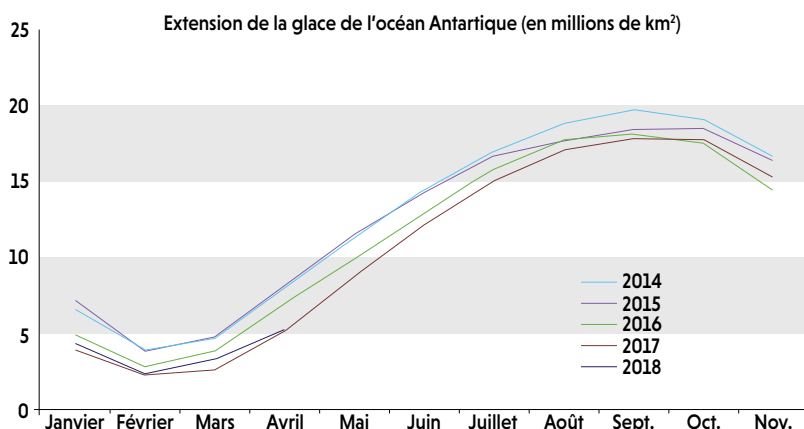
il fallait faire attention à ne pas cogner et endommager la coque du bateau. Ensuite, nous avons foré ces blocs, pour y prélever des carottes de glace uniformes (des cylindres de glace), une manipulation particulièrement acrobatique. Avec le bateau toujours en mouvement et ballotté par une mer parfois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