

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.