

et le monde extérieur, sans avoir recours à nos sens ou à nos moyens d'action (membres et muscles). On imagine sans peine les applications de tels dispositifs, notamment dans le domaine médical, pour redonner, par exemple à des patients souffrant d'un handicap moteur sévère, la capacité de se mouvoir, d'agir sur le monde et de communiquer.

Une ICM se compose de deux éléments principaux: des capteurs qui enregistrent l'activité du cerveau, et un ordinateur qui décode cette activité et commande un appareil qui va la convertir en mouvements ou en messages permettant de communiquer avec l'entourage du patient. Les capteurs sont principalement de deux types: d'une part les capteurs non invasifs, tels que ceux d'électroencéphalographie (EEG), qui mesurent à la surface du crâne les différences de potentiels électriques engendrées par l'activité de larges populations de neurones; d'autre part les capteurs invasifs, qui nécessitent une intervention chirurgicale pour implanter par exemple des microélectrodes mesurant chacune l'activité d'un ou quelques neurones. L'usage de ces derniers est naturellement restreint à certains patients, susceptibles de bénéficier de ces neurotechnologies et ayant donné leur consentement.

À l'inverse des études réalisées en EEG (voir l'encadré page 69), celles qui utilisent des microélectrodes implantées sont nettement plus rares et se concentrent sur le cas d'un ou deux patients tout au plus. Elles laissent toutefois le patient libre de bouger les yeux et permettent une communication plus naturelle, entièrement guidée par le rythme de l'utilisateur. Les signaux enregistrés proviennent de quelques neurones ciblés précisément pour leur implication dans la planification et l'exécution de mouvements. L'enjeu est d'y décoder un ordre moteur, associé à la tentative d'exécution d'un mouvement que le patient n'est plus capable de réaliser.

Très peu de patients – ils sont surtout aux États-Unis – ont ainsi réussi à contrôler un bras robotisé pour se saisir d'un objet et le manipuler. Le niveau de réussite des ICM est encore plus faible pour les tentatives de communiquer avec l'entourage. À ce jour, aucune interface n'a pu directement décoder le contenu du langage en temps réel. En revanche, une équipe de l'université Stanford, dont Francis Willett faisait aussi partie, a mis au point en 2016 une interface permettant au patient paralysé de pointer successivement les lettres de son choix sur un écran pour former des mots. Il parvenait ainsi à écrire une quarantaine de caractères par minute.

Les chercheurs ont fait cette fois le pari de décoder des mouvements nettement plus complexes pour atteindre des performances comparables à celles enregistrées de façon

courante chez des personnes d'environ 65 ans (l'âge du patient ayant reçu l'implant) lorsqu'elles utilisent leur smartphone au quotidien (environ 115 caractères par minute). Et pour cela, paradoxalement, l'équipe a délaissé la stratégie consistant à décoder le geste de pointer vers une position sur l'écran, pour tenter de décoder le geste beaucoup plus complexe de l'écriture manuscrite.

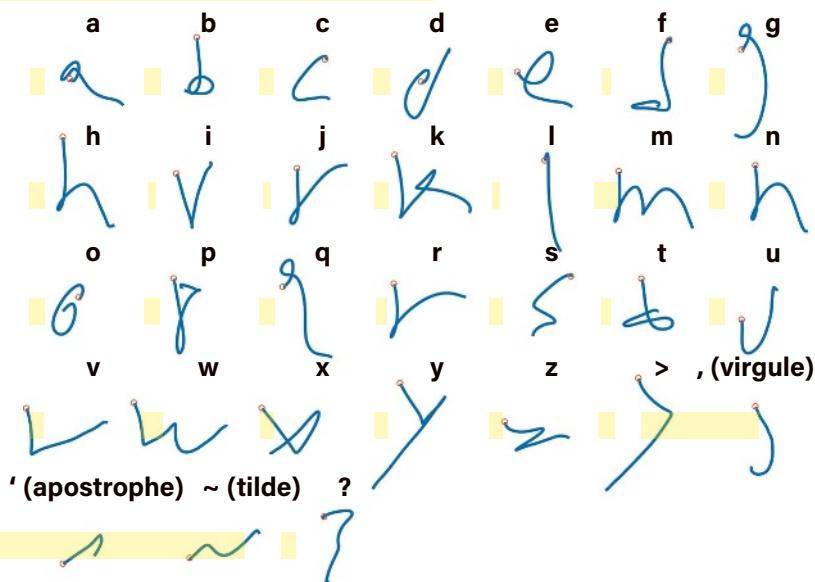
DÉCODER L'ACTIVITÉ CÉRÉBRALE CORRESPONDANT À L'ÉCRITURE MANUSCRITE

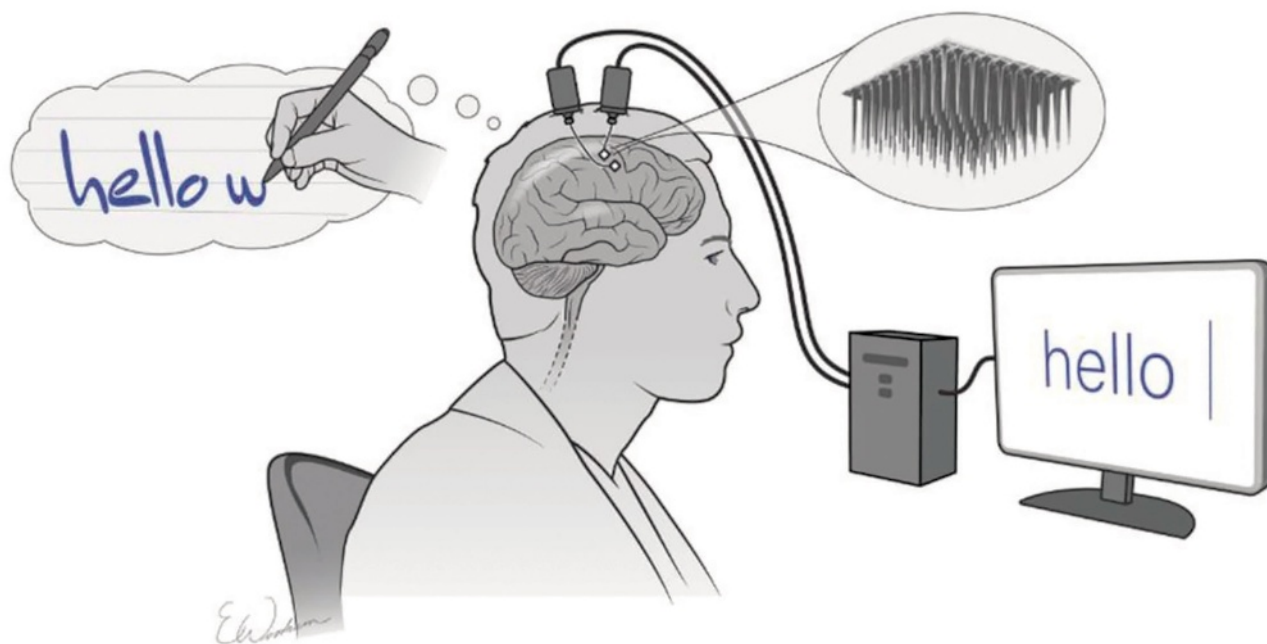
Le but des chercheurs a été de restituer une communication écrite en temps réel chez ce patient, en décodant l'activité d'environ 200 neurones corticaux spécialisés dans le contrôle de la main... Pour ce faire, ils ont procédé par étapes.

Premièrement, au moyen de microélectrodes implantées, ils ont enregistré de manière continue la dynamique des décharges et des silences de chaque neurone pendant que le sujet s'efforçait d'écrire à la main, lettre par lettre, des mots qu'on lui dictait. Il s'agissait toutefois d'une tâche purement mentale, car, paralysé jusqu'au niveau de la nuque, le patient n'était capable que de micromouvements de la main.

Les chercheurs lui ont demandé de tenter d'écrire plusieurs fois un même caractère, et ont recueilli les données neuronales issues de chaque réalisation de chaque caractère. Ensuite, afin d'obtenir une «signature» neuronale pour chaque caractère, les scientifiques ont dû tenir compte du fait que la vitesse d'exécution mentale de chaque lettre pouvait être plus ou moins rapide d'une tentative à l'autre, de sorte que les décharges électriques des neurones pouvaient être plus ou moins espacées dans le temps. Il a ainsi fallu les «recaler»

Chacune de ces lettres a été tracée par l'ordinateur à partir des données captées dans le cerveau du patient en train de s'imaginer les écrire à la main.





temporellement pour révéler le tracé électrique typique de chaque caractère.

La force de cette analyse fondée sur des tracés manuscrits repose sur un fait caractéristique de l'écriture à la main: le stylo suit des courbes, accélère, ralentit, fait demi-tour, revient sur lui-même. Il faut donc s'attendre à ce que le cerveau encode ces paramètres relatifs aux déplacements du stylo imaginaire du patient. C'est effectivement ce qui se produit: l'activité électrique des neurones au cours du temps permet de prédire la trajectoire du stylo imaginaire. Et ça marche: le taux de reconnaissance des lettres atteint 94% de réussite...

DÉCODER DES PHRASES EN TEMPS RÉEL

Toutefois, une chose est de décoder l'écriture d'une lettre «hors ligne» (c'est-à-dire à tête reposée, en prenant le temps, et non en temps réel pendant que le patient écrit ses lettres mentalement), à partir de nombreuses données moyennées; une autre est de réaliser ce décodage en temps réel, à partir des données d'une seule réalisation! Pour ce faire, les chercheurs ont entraîné un réseau de neurones artificiels dit «récurrent». On utilise ces réseaux typiquement pour traiter des flux de données présentant une grande structure temporelle, c'est-à-dire des corrélations fortes entre ce qui se passe à un instant donné et ce qui est observé à un instant ultérieur.

La plupart des données comportementales ont une forte structure temporelle: lorsque vous observez la vidéo d'une personne en train d'allumer une cigarette, votre cerveau prédit automatiquement, en observant un geste à l'instant t ,

Le système d'aide à l'écriture se compose d'une grille de microélectrodes implantées dans l'aire du cerveau qui contrôle les mouvements de la main et d'un algorithme qui convertit l'activité électrique des neurones en tracés de lettres sur l'écran.

quel sera (ou pourra être, du moins) le geste à l'instant $t + 1$ seconde, etc. Le langage est aussi un exemple de flux de données à haute structure temporelle, et les chercheurs se sont d'ailleurs directement inspirés des intelligences artificielles dédiées à la reconnaissance de la parole, qui affichent des taux d'erreur de l'ordre de 5%.

Toutefois, ces algorithmes d'apprentissage profond ne pouvaient pas être appliqués tels quels, pour deux raisons. La première est qu'ils sont généralement entraînés sur un très grand nombre de données, une condition souvent nécessaire pour atteindre de très bonnes performances. Or les données neuronales ne

LES APPROCHES NON INVASIVES POUR LA COMMUNICATION

En électroencéphalographie (EEG), les activités de l'ensemble du cortex se mélangent, notamment du fait de la boîte crânienne qui les diffuse à sa surface. Cela rend particulièrement difficile leur localisation précise.

Par ailleurs, seules les basses fréquences (inférieures à 80 hertz), de haute amplitude et plus synchronisées, sont visibles. En conséquence, décoder une commande fine et complexe telle que l'articulation d'un mot ou la trajectoire d'un mouvement de la main est actuellement hors de portée de l'EEG. Pour restaurer la communication, les interfaces cerveau-machine qui utilisent l'EEG s'appuient donc sur des stratégies de contournement. Typiquement, des lettres sont rapidement flashées à l'écran et c'est l'attention du sujet exclusivement portée vers la lettre cible qui engendrera une réponse cérébrale spécifique, reconnaissable par l'ordinateur. Mais outre le fait que le patient ne peut être autonome pour installer et désinstaller les capteurs EEG, démarrer ou interrompre la communication, ces dispositifs mobilisent fortement l'attention, mais aussi le regard du patient. Les flashes, à la longue, fatiguent les yeux et une calibration des algorithmes de décodage reste de mise avant chaque utilisation. Enfin, ils atteignent typiquement des rythmes de communication de quelques caractères par minute. Le record est certes de l'ordre de 60 caractères par minute, mais il est obtenu en laboratoire chez de jeunes volontaires sains, sachant qu'une personne âgée d'une soixantaine d'années tape sur un clavier à la vitesse d'environ 115 caractères par minute.