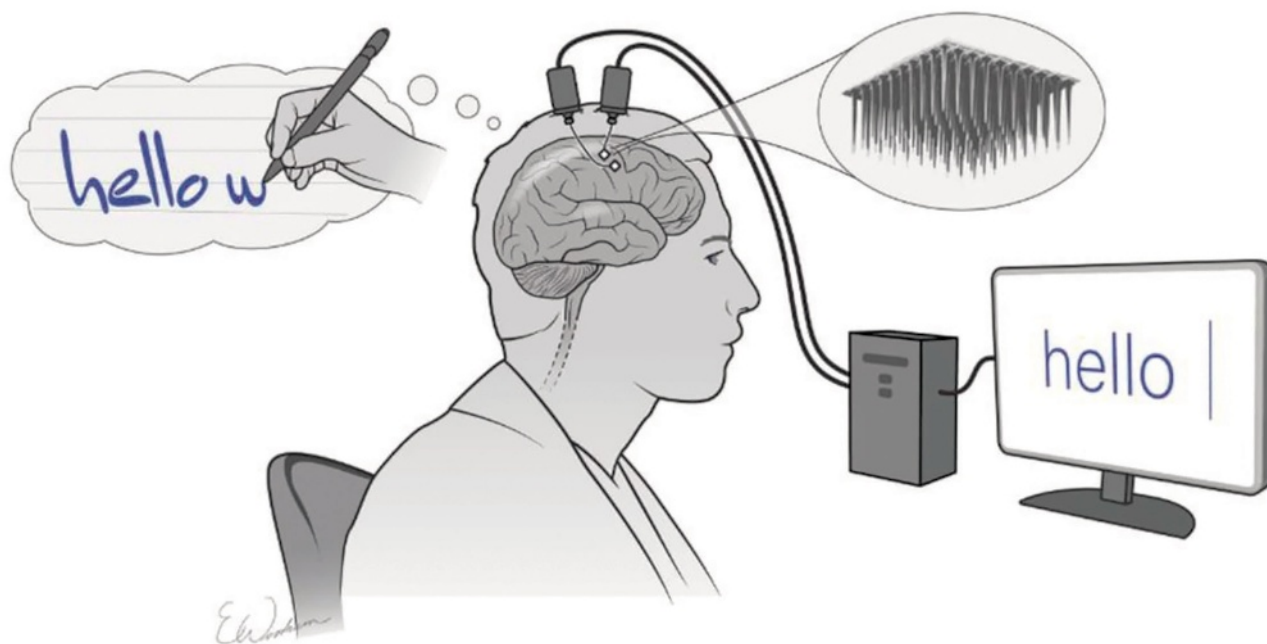




temporellement pour révéler le tracé électrique typique de chaque caractère.

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...

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

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 ,

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.

peuvent pas être acquises dans les mêmes proportions que des échantillons de paroles, loin de là. La deuxième raison est liée au fait que dans le cas d'une écriture où le patient est laissé relativement libre, il est impossible de savoir quand débute et quand s'achève l'écriture d'une lettre donnée.

Rarement patient a aussi bien porté ce qualificatif ! Celui-ci s'est prêté à 3 jours d'enregistrements de données d'entraînement pour l'algorithme, avant d'entamer, sur 5 jours consécutifs, les séances de test du système en temps réel. Et chaque séance débutait par l'acquisition de données complémentaires afin d'entraîner l'algorithme de manière plus spécifique à la séance du jour. Cela a constitué une base de données de plus de sept heures et demie d'enregistrements, soit 572 phrases de plus de 30 000 caractères au total.

En temps réel, l'algorithme évalue à chaque instant la probabilité, pour chaque symbole de l'alphabet, d'être le caractère écrit. Lorsque l'une des probabilités franchit un seuil significatif, ce symbole est choisi et produit à l'écran.

JUSQU'À 90 CARACTÈRES PAR MINUTE

La vidéo a été mise en ligne par les chercheurs sur le site de *Nature*. Elle montre le même patient à cinq ans d'intervalle. Sur la partie basse de l'écran, il utilise l'interface en temps réel pour déplacer un curseur à l'écran et appuyer sur les touches d'un clavier virtuel. Sur la partie haute, il utilise la nouvelle interface pour écrire la même phrase qui s'affiche petit à petit, suite au décodage en temps réel de son écriture manuscrite. La deuxième approche est nettement plus rapide. En moyenne, le patient atteint une vitesse pouvant aller jusqu'à 90 caractères par minute.

De surcroît, les chercheurs ont réalisé une série d'expériences et analyses complémentaires qui suggèrent que le décodage de l'écriture manuscrite, pourtant au premier abord plus difficile, se révèle plus efficace, justement parce que les mouvements associés sont plus complexes et que leurs signatures neuronales sont ainsi plus spécifiques et mieux différenciables les unes des autres, notamment dans leur dynamique. En effet, les mouvements que fait votre main quand vous dessinez un *d* ou un *f* sont bien plus distincts que ceux que vous réalisez pour appuyer sur la touche *d* ou *f* de votre clavier d'ordinateur...

Ainsi, contre toute attente, c'est le décodage de l'écriture manuscrite qui permet d'atteindre les meilleures performances de communication par ICM. Mais pour totalement appréhender la portée de ces résultats, il faut aussi en souligner les limites, ce que n'ont globalement pas manqué de faire les auteurs des travaux eux-mêmes.



Contre toute attente, c'est le décodage de l'écriture manuscrite – et non sur clavier – qui permet d'atteindre les meilleures performances de communication par interface cerveau-machine

Cette étude à partir d'un seul patient soigneusement sélectionné n'est bien sûr qu'une première démonstration, mais une démonstration irréfutable de la faisabilité de ce type d'interaction, même neuf ans après l'accident qui a causé son handicap sévère. Par ailleurs, si les microélectrodes utilisées ont déjà montré leur robustesse, parfois jusqu'à trois ans après leur implantation, développer des implants sûrs, durables, miniaturisés, souples et permettant d'enregistrer un maximum de neurones reste un défi majeur. Une autre solution prometteuse est d'ailleurs celle de l'électrocorticographie (ECoG), moins invasive, qui consiste à poser une grille d'électrodes à la surface du cortex, au moyen d'une chirurgie moins lourde.

Enfin, il est important de rappeler que les patients tétraplégiques ont une capacité de parole très largement préservée, généralement suffisante pour commander une synthèse vocale et leur permettre d'écrire. Autrement dit, le patient implanté dans cette étude ne représente pas la population des principaux bénéficiaires de ce type d'interface, à savoir les personnes en état d'enfermement, à la suite d'un accident du tronc cérébral ou à un stade avancé d'une sclérose latérale amyotrophique (SLA). Il reste donc à démontrer que ces patients, complètement paralysés ou presque, pourraient contrôler une telle interface. Les études menées auprès de ces patients avec de précédentes interfaces incitent à la prudence... ■

BIBLIOGRAPHIE

F. R. Willett *et al.*, **High-performance brain-to-text communication via handwriting**, *Nature*, vol. 593, pp. 249-254, 2021.

C. Pandarinath *et al.*, **High performance communication by people with paralysis using an intracortical brain-computer interface**, *eLife*, vol. 6, article e18554, 2017.