

Interfaces cerveau-machine (Les)

Frédéric Dehais, Fabien Lotte

ISAE-SUPAERO, université fédérale de Toulouse, Toulouse, France.

*Inria Bordeaux Sud-Ouest/LaBRI (CNRS/université Bordeaux, Bordeaux INP),
Talence, France.*

Origines

Les interfaces cerveau-machine trouvent leurs origines à travers les travaux princeps en électrophysiologie de Hans Berger sur les ondes cérébrales en 1920. Il faut toutefois attendre les années 1960 pour voir la démonstration d'une communication directe entre un cerveau et une machine. Ainsi, Edmond Dewan entraîne des volontaires à contrôler certaines ondes cérébrales pour contrôler par « la pensée » une lumière ou envoyer des messages en morse (Dewan 1967). En effet, si la puissance de ces ondes, mesurées par un électroencéphalographe (EEG), augmente ou diminue, alors la machine comprend que le sujet souhaite respectivement allumer ou éteindre l'interrupteur lumineux ou encore générer ou non une impulsion en morse. Un an plus tard, il collaborait avec l'artiste Alvin Lucier, qui crée une performance musicale en faisant résonner en direct des percussions par l'intermédiaire de son activité cérébrale. À la même époque, Joseph Kamiya ouvrait la voie du *neurofeedback*, en démontrant qu'il était possible de réguler sa propre activité cérébrale à l'aide de stimuli visuels, auditifs ou tactiles pour, en retour, améliorer sa performance cognitive. En 1973, Jacques Vidal introduisait le terme de *brain computer interface* – ou interface cerveau-machine (ICM) – qui restera pour désigner tous types de communications directes entre une machine et un utilisateur, passant uniquement par l'activité cérébrale, cette dernière étant mesurée et analysée par le système.

Les développements récents dans le domaine des capteurs neurophysiologiques, de l'intelligence artificielle et de l'informatique embarquée insufflent un regain d'intérêt pour les ICM. Ces neurotechnologies sont désormais en pleine expansion dans le domaine clinique (technologies d'assistance, rééducation motrice, etc.), du *gaming* pour augmenter l'expérience du joueur et envahissent le grand public à travers des applications au service du bien-être (expérience de méditation, amélioration du sommeil). Devenues moins intrusives, elles offrent également des perspectives intéressantes pour la neuroergonomie, à travers l'étude du cerveau « au travail » sur le terrain (Dehais, Lafont, Roy, Fairclough 2020). Elles promeuvent de nouvelles formes d'interaction et promettent d'améliorer la performance humaine et son couplage avec la machine. Fondamentalement, toutes les techniques d'imagerie cérébrale invasives (c'est-à-dire les électrodes implantées) et non invasives, telles que l'EEG ou encore

la spectroscopie en proche infrarouge, peuvent être utilisées pour mettre en œuvre une ICM qui peut être soit « active » soit « passive » (Clerc, Bougrain, Lotte 2016).

Interfaces cerveau-machine actives : contrôler et agir sur son environnement

Les ICM actives permettent à un utilisateur d'interagir avec un artefact (le curseur d'une souris, par exemple) en générant une « commande mentale » qui sera interprétée par un algorithme. Ces ICM ont d'abord été développées dans le but d'apporter à des personnes en situation de handicap moteur la capacité de contrôler des effecteurs, tels qu'un fauteuil roulant, ou de pouvoir communiquer en affichant des lettres sur un écran. Dans l'état actuel des choses, les ICM ne « décodent » pas les intentions ou ne lisent pas dans les pensées d'un individu. Généralement, l'utilisateur doit s'entraîner à produire consciemment des signaux cérébraux « simples » et « clairs », par exemple en se relaxant, en se concentrant ou en réalisant de l'imagerie motrice mentale (par exemple, imaginer un mouvement de la main), afin d'induire la bonne commande. En parallèle, la machine apprend à reconnaître lesdites commandes, lors d'une phase de calibration, à partir d'exemples de signaux cérébraux de l'utilisateur de l'ICM. Une fois ce coapprentissage humain-machine réalisé, il est possible de pouvoir interagir avec un système (un robot, un avion) pour le diriger mentalement. Les systèmes actuels sont cependant loin d'être parfaits et se trompent régulièrement de commandes mentales reconnues. Ils ne peuvent donc pas forcément être utilisés pour des applications de contrôle critique. Une autre approche dite « réactive » est de faire flasher des petits damiers à une certaine fréquence (par exemple, 6 Hz) sur un écran. Si le sujet se focalise sur le damier à 6 Hz, alors sa réponse cérébrale, mesurée avec l'EEG, va augmenter dans cette fréquence précise et l'ICM pourra décoder que l'attention y est portée (Allison *et al.* 2010). Ainsi, en plaçant quatre damiers ayant des fréquences différentes, par exemple en haut, en bas, à droite et à gauche d'un écran, l'utilisateur peut respectivement y porter son attention pour faire avancer, reculer, faire tourner à droite ou à gauche un robot. L'avantage de cette technique est de réduire considérablement, voire d'éviter, le passage par une phase de calibration et d'apprentissage. Cependant, le scintillement des stimuli induit une fatigue oculaire de l'utilisateur et un risque d'épisodes épileptiques photosensibles. De plus, ces dispositifs requièrent toute l'attention visuelle de l'utilisateur, qui n'est donc plus disponible pour autre chose, par exemple, pour porter attention à son environnement.

Interfaces cerveau-machine passives : vers une interaction « implicite »

Dans le cas des ICM passives, le but n'est alors plus de contrôler volontairement un effecteur mais d'utiliser l'activité cérébrale pour enrichir l'interaction Homme-machine de manière implicite (Zander, Kothe 2011). L'enjeu est d'inférer des états mentaux d'un opérateur, comme son niveau de charge mentale, de fatigue, de stress,

pour en retour adapter dynamiquement l'interaction et maintenir un engagement optimal. L'idée est alors d'adapter soit l'interface (par exemple, la modification de la modalité d'une alarme pour la rendre plus saillante), soit le partage de tâche et d'autorité entre l'humain et les systèmes, soit l'opérateur par différentes techniques de stimulation (Dehais, Lafont, Roy, Fairclough 2020). Des démonstrations récentes de telles ICM passives ont pu être faites en condition opérationnelle réelle pour inférer l'état d'opérateurs humains tels que des pilotes d'avion. Enfin, une dernière utilisation des ICM passives, particulièrement intéressante pour l'ergonomie, est l'évaluation objective d'interfaces et de l'expérience utilisateur. Ces ICM peuvent fournir des indications en temps réel pour quantifier objectivement l'effort mental, la fatigue cognitive ou des dimensions émotionnelles liées à l'utilisation d'un objet ou d'une interface. De nombreux industriels dans le domaine du transport, du jeu vidéo et des réseaux sociaux investissent dans cette approche pour garantir un confort et une sécurité accrue.

Les interfaces cerveau-machine : défis

L'ICM représente un domaine de recherche plein de promesses pour de nombreuses applications en ergonomie. Il reste néanmoins plusieurs défis à relever pour améliorer leur utilisabilité. Tout d'abord, l'ICM nécessite de porter des électrodes solides dont l'inconfort limite l'utilisation sur une durée prolongée. L'élaboration de nouveaux matériaux (par exemple, l'utilisation de tissus conducteurs) peut apporter une première piste de solution, mais la conception de casques plus ergonomiques doit être pensée. Ensuite, la plupart des ICM nécessitent une phase de calibration où l'utilisateur doit réussir à produire les bonnes commandes pour que l'algorithme apprenne à les reconnaître. Cette étape peut parfois être longue, fastidieuse et doit être généralement réalisée à chaque nouvel usage. De nouveaux algorithmes d'apprentissage machine ont été développés pour augmenter la précision de la classification et réduire le temps de la phase de calibration. Une approche complémentaire est celle de l'*open science* (à savoir le partage de données sur Internet) pour créer une grande base de données neurophysiologiques et entraîner les algorithmes sur davantage d'exemples. Au-delà de ces travaux formels, l'amélioration de la relation ICM-utilisateur semble être une voie trop souvent mise de côté par les concepteurs. Des travaux (Jeunet, Lotte, N'Kaoua 2016 ; Allison *et al.* 2010) ont montré que de nombreux facteurs individuels peuvent expliquer le succès ou l'échec à maîtriser une ICM. Par exemple, lors de la phase de calibration et d'entraînement, l'utilisateur dispose de peu d'informations sur sa performance (en particulier lorsque celle-ci est mauvaise) et le retour d'informations qui lui est fourni est généralement peu informatif et unimodal (c'est-à-dire visuel). Les tâches pour s'entraîner sont trop souvent répétitives et dirigées, et ne s'adaptent pas à l'utilisateur. Ces travaux recommandent de construire un modèle utilisateur qui pourrait prédire sa performance en fonction de son profil (personnalité, compé-

tences, etc.) et de s'en servir pour personnaliser la conception de l'ICM et l'entraînement de l'utilisateur à son contrôle. En effet, contrôler une ICM est une compétence qui s'apprend, tout comme on apprend à faire du vélo. Or, pour l'instant, les chercheurs ne savent pas encore comment rendre cet apprentissage efficace et utile. Enfin, les questions d'acceptation de ces technologies dans un cadre professionnel et les problématiques éthiques qui y sont associées doivent également conduire à de nombreuses recherches de terrain. Ainsi, l'ergonomie est une discipline qui peut non seulement fortement contribuer à l'amélioration des ICM et bénéficier en retour de ces dispositifs pour mieux comprendre la relation entre performance, cerveau et environnement technologique.

Bibliographie

- Allison, B., Luth, T., Valbuena, D., Teymourian, A., Volosyak, I., Graser, A. (2010). BCI demographics: How many (and what kinds of) people can use an SSVEP BCI? *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, 18(2), 107-116.
- Clerc, M., Bougrain, L., Lotte, F. (2016) *Les Interfaces cerveau-ordinateur 1 : Fondements et méthodes/Les Interfaces cerveau-ordinateur 2 : Technologie et applications*. ISTE-Wiley, Londres.
- Dehais, F., Lafont, A., Roy, R., Fairclough, S. (2020). A neuroergonomics approach to mental workload, engagement and human performance. *Frontiers in neuroscience*, 14, 268.
- Jeunet, C., Lotte, F., N'Kaoua, B. (2016). Apprentissage utilisateur dans les interfaces cerveau-ordinateur. Dans *Les Interfaces cerveau-ordinateur 1 : Fondements et méthodes*, édité par Clerc, M., Bougrain, L., Lotte, F. ISTE-Wiley, Londres.
- Zander, T.O., Kothe, C. (2011). Towards passive brain-computer interfaces: applying brain-computer interface technology to human-machine systems in general. *Journal of neural engineering*, 8(2), 025005.