

Zeitschrift: Tracés : bulletin technique de la Suisse romande
Herausgeber: Société suisse des ingénieurs et des architectes
Band: 131 (2005)
Heft: 09: Corps et machine

Artikel: Contrôler une machine à travers le cerveau
Autor: Millán, José del R.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-99378>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 05.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Contrôler une machine à travers le cerveau

Ce n'est plus de la science-fiction : il est aujourd'hui possible de contrôler des appareils électroniques par la seule activité cérébrale. Un groupe de recherche à l'IDIAP Research Institute de Martigny, piloté par José del R. Millán¹, développe depuis peu des prototypes d'interfaces cérébrales qui permettent à l'homme d'interagir avec un ordinateur.

Depuis toujours, l'homme rêve de contrôler son monde par la seule pensée. Il voudrait établir un dialogue silencieux entre les machines et son cerveau, commander des engins à travers sa propre activité cérébrale. Aujourd'hui, ce rêve commence à devenir réalité grâce à l'effort de groupes scientifiques multidisciplinaires travaillant à l'intersection des neurosciences, de l'informatique et de l'ingénierie biomédicale. Ces dernières années, plusieurs d'entre eux ont

développé les premiers prototypes d'interfaces cérébrales (IC), dont le but est de permettre à l'homme d'interagir avec un ordinateur par l'intermédiaire d'une modulation consciente de son activité cérébrale.

Une IC analyse cette activité en temps réel afin d'en dériver une information utile sur l'état mental des sujets, laquelle est ensuite transformée en une action externe, par exemple le choix d'une lettre sur un clavier virtuel [1]² ou le déplacement d'un robot [2] dans un environnement donné (fig. 2 et 3). Le sujet n'effectue aucune action physique : il suffit qu'il imagine des mouvements de bras, ou bien qu'il exécute mentalement des tâches comme la rotation de figures géométriques ou la sélection de mots qui commencent par une même lettre. De véritables prototypes d'IC n'ont été réalisés que récemment [3], mais un pas important pour leur développement date des années 60 : on a alors montré que les singes pouvaient apprendre à contrôler l'activité de leurs neurones, et qu'il était possible de prédire la direction du regard d'un sujet tout en analysant l'activité électrique de son cerveau.

Modéliser l'activité cérébrale

La possibilité d'envoyer des commandes mentales à une machine est basée sur le fait que le cerveau codifie toutes nos capacités - motrices et cognitives - selon une distribution complexe : chaque région cérébrale participe à l'exécution de plusieurs tâches mentales et chaque tâche mentale active plusieurs régions, avec une intensité et un rythme légèrement différents. Le défi consiste à modéliser les schémas d'activation de différentes régions cérébrales associées à plusieurs tâches mentales, pour ensuite reconnaître en temps réel quelle est la tâche que le sujet est en train d'exécuter. Ceci peut permettre à une personne avec de graves handicaps physiques de contrôler des machines qui l'aident à étendre sa mobilité et à augmenter ou retrouver sa capacité de communication.

¹ Le quotidien *El País* lui a consacré une page dans son édition du 9 février 2005.

² Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

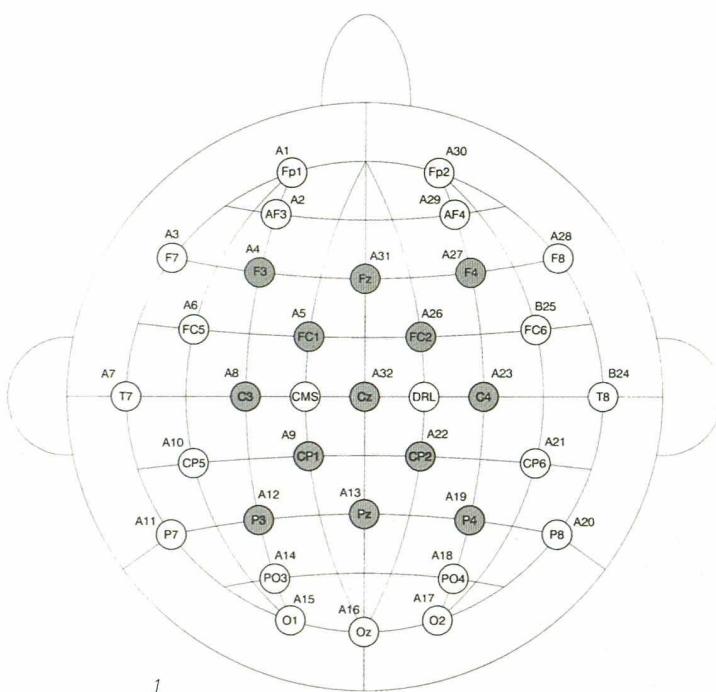


Fig. 1 : Positions des 32 électrodes EEG sur le cuir chevelu. Les entrées fournies au classifieur statistique de l'IC correspondent à des caractéristiques extraites d'une combinaison de huit des électrodes indiquées ici en gris.

Fig. 2 : Contrôle mental d'un robot simulant une chaise roulante. Le sujet guide le robot à travers les différentes chambres d'une maquette d'appartement. L'écran montre comment le sujet reçoit le feedback : la réponse du classifieur est indiquée à l'aide de trois barres de couleur.

Une IC peut analyser une variété de signaux provenant du cerveau. La plupart des IC utilisent des signaux enregistrés à l'aide d'un électroencéphalogramme (EEG), à savoir l'enregistrement de l'activité électrique du cerveau à l'aide d'électrodes placées sur la surface du cuir chevelu (fig. 1). La source principale d'un EEG est l'activité synchrone de milliers de neurones corticaux. Mesurer un signal EEG est une méthode simple et non envahissante (elle n'a pas besoin d'implants dans le cerveau), mais elle ne fournit pas d'informations détaillées sur l'activité de chaque neurone, ni même de petits ensembles de neurones. L'implant de microélectrodes dans le cortex cérébral apporterait probablement plus de précisions, mais nous écartons ces méthodes envahissantes pour des raisons éthiques et technologiques.

Certains groupes de recherche exploitent ce qu'on appelle des «potentiels évoqués», c'est-à-dire la réponse automatique du cerveau à des *stimuli* externes. Ces réponses sont en principe facile à repérer, mais ne permettent pas un contrôle rapide et flexible d'un dispositif externe telle qu'une prothèse.

Une alternative plus naturelle et plus pratique consiste à utiliser l'activité mentale spontanée, par exemple la variation locale des rythmes des signaux EEG. Les rythmes les plus souvent utilisés sont reliés à l'imagination d'un mouvement d'une partie du corps. Ils sont enregistrés à partir des régions centrales du cuir chevelu, au-dessus du cortex sensorimoteur (les points C3 et C4 sur la figure 1).

Analyser la variation des rythmes

De notre côté, nous avons choisi d'utiliser une combinaison de tâches motrices et cognitives, par exemple des opérations arithmétiques ou le langage. Concrètement, nous enregistrons des signaux EEG à l'aide d'un système commercial portable utilisant un bonnet incorporant 32 électrodes situées à des positions standard du système international 10-20 (la figure 1 montre les positions). Cependant, notre analyse est basée sur un petit sous-ensemble de ces électrodes (voir les combinaisons différentes des points gris sur la figure 1). Par exemple, dans le cas des deux applica-

tions présentées ici, nous avons enregistré des signaux EEG provenant des électrodes F3, F4, C3, Cz, C4, P3, Pz et P4.

En résumé, l'objectif est de reconnaître la tâche mentale sur laquelle le sujet se concentre par l'analyse des variations des rythmes EEG sur plusieurs régions cérébrales. Les signaux EEG sont enregistrés à l'aide d'un système portable et traités en temps réel afin d'en extraire des caractéristiques adéquates pour le «classifieur», le programme qui tente de discriminer les signaux et qui constitue le cœur de l'IC.

Tout d'abord, le signal EEG est filtré à l'aide d'un Laplacien de surface, ce qui permet d'extraire un signal qui représente mieux l'activité corticale provenant des sources situées au-dessous des électrodes. Par la suite, la densité spectrale est estimée dans la bande 8-30 Hz seize fois par seconde sur la dernière seconde du signal, à une résolution de fréquence de 2 Hz pour chaque canal.

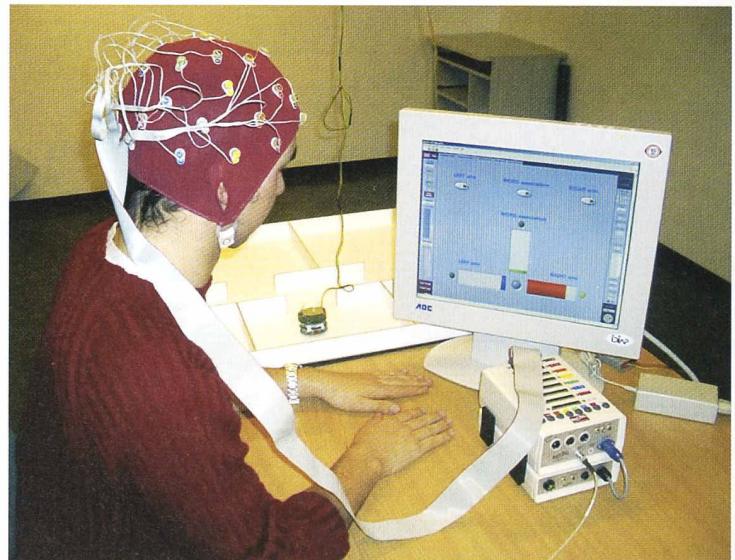
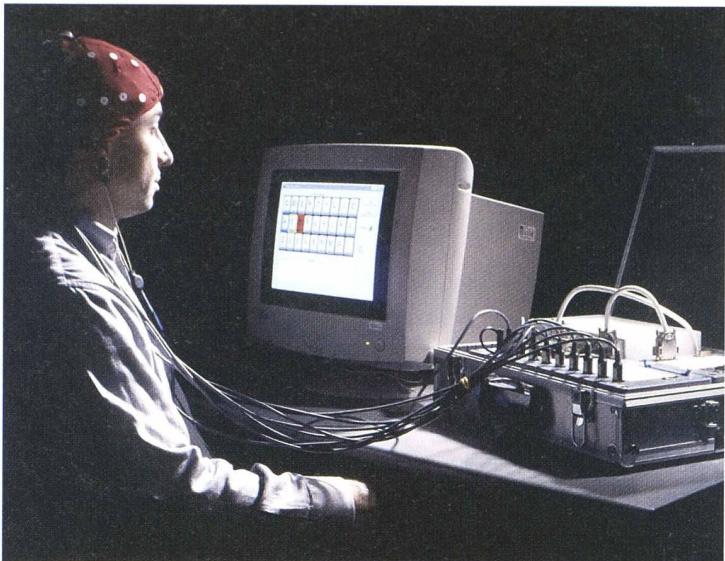


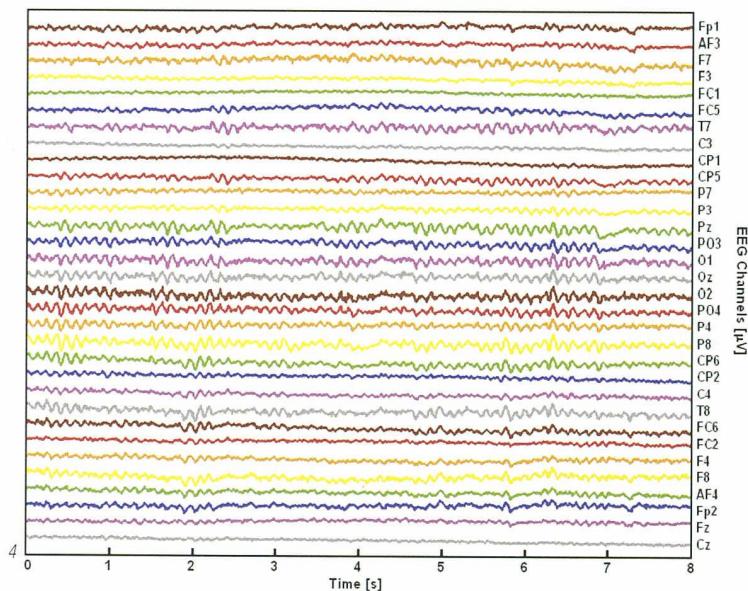
Fig. 3 : Clavier virtuel pour la communication mentale. Le sujet sélectionne des lettres du clavier et écrit des messages.

Fig. 4 : Exemple d'un électroencéphalogramme (EEG) enregistré avec un système à 32 électrodes

(Tous les documents illustrant cet article ont été fournis par l'auteur)



3



Le problème est que nous ne connaissons bien sûr pas la signature de ces tâches mentales. Ainsi, notre approche consiste à découvrir des schémas EEG typiques de chaque tâche en utilisant des techniques d'apprentissage statistique afin d'entraîner le classifieur. Celui-ci est basé sur des distributions Gaussiennes et entraîné à différencier trois tâches mentales différentes. Il est composé de plusieurs unités de traitement spécialisées chacune dans un prototype d'une des tâches mentales à reconnaître. Plusieurs prototypes par tâche mentale sont utilisés afin de mieux estimer la distribution de probabilité des tâches. L'objectif consiste donc à trouver la position (moyenne) appropriée des prototypes ainsi que leur influence (variance) respective.

Nous utilisons pour cela un algorithme de descente de gradient stochastique afin de minimiser l'erreur quadratique moyenne. De manière intuitive, les prototypes tentent de se rapprocher des signaux EEG de la tâche mentale qu'ils doivent représenter et de s'éloigner des autres. A la fin de l'entraînement, la réponse du modèle à un signal EEG correspond à la tâche ayant accumulé la plus grande probabilité, assumant un seuil de confiance suffisamment élevé. Sinon, la réponse est : inconnu. L'incorporation de ce critère de rejet permet d'éviter de prendre des décisions risquées. En fait, d'un point de vue pratique, une faible erreur de classification est un critère de performance important pour une IC, notamment pour que les sujets ne soient pas frustrés ou arrêtent d'utiliser le système.

Un apprentissage mutuel

Mais l'adaptation de la machine ne suffit pas : le sujet doit aussi apprendre à utiliser l'IC. En l'occurrence, nous nous basons sur un processus d'apprentissage mutuel où le sujet et l'IC sont couplés et s'adaptent l'un à l'autre : le classifieur apprend les signaux EEG typiques des tâches spécifiques au sujet, pendant que le sujet développe une stratégie mentale pour lui permettre de se faire comprendre par sa propre IC. Pour apprendre à contrôler son EEG, le sujet reçoit un *feedback* visuel (fig. 2) qui lui indique la tâche que le classifieur a reconnue, de telle sorte que la stratégie mentale utilisée soit renforcée de façon positive ou négative selon la réponse correcte ou non du classifieur.

Ce double apprentissage accélère le processus d'adaptation. Grâce à ce processus, nos sujets ont pu obtenir de bonnes performances en seulement quelques heures. Notons cependant que d'autres chercheurs ont montré que des sujets pouvaient aussi apprendre à contrôler leur activité cérébrale à l'aide de longues séances d'entraînement pour s'habituer à des IC non-adaptables.

Contrôler des robots

Nous avons développé ces dernières années plusieurs démonstrateurs d'IC. Ainsi, nous nous sommes intéressés au contrôle de robots et de prothèses artificielles. Dans ce domaine, le recours à des implants d'électrodes a été considéré jusqu'ici comme indispensable: on pensait que les systèmes basés sur les EEG étaient trop lents pour contrôler des séquences de mouvements rapides et complexes. Nous avons cependant montré qu'une IC basée sur les EEG pouvait aussi permettre le contrôle d'un robot mobile. Il s'agit en l'occurrence d'un engin simulant une chaise roulante motorisée qui effectue des trajectoires dans un environnement composé de plusieurs chambres (fig. 2).

Les tâches mentales du sujet sont alors associées à des commandes de haut niveau - par exemple « tourne à droite à la prochaine porte » - et le robot exécute ces commandes de manière autonome en utilisant ses propres capteurs de distance. Deux sujets ont réussi à diriger mentalement le robot pendant plusieurs minutes en visitant trois ou quatre chambres dans l'ordre désiré. Les résultats expérimentaux montrent que le contrôle mental du robot est à peine moins bon que le contrôle manuel pour les mêmes trajectoires, et ce genre de résultat pourrait facilement s'étendre à d'autres applications comme le contrôle de l'équipement électronique d'une maison dite « intelligente ».

Un clavier virtuel

Dans un autre ordre d'idées, l'IC peut servir à choisir des lettres sur un clavier virtuel apparaissant à l'écran de l'ordinateur, afin de pouvoir écrire un message (fig. 3). Au début, le clavier complet apparaît divisé en trois sections, chacune associée à une tâche mentale. Dès que le sujet a fait son choix, et que ce dernier est reconnu par l'IC, la section choisie est de nouveau séparée en trois sous-sections. L'opération est répétée ainsi jusqu'au choix d'une lettre unique. Celle-ci est alors ajoutée au message et le processus de sélection peut recommencer à partir du clavier complet, pour le choix de la lettre suivante.

Pour nos sujets entraînés, il fallait en moyenne vingt-deux secondes pour choisir une lettre, et l'un des sujets pouvait même écrire à une vitesse de sept secondes par lettre (sans mesures de vérification des choix). Pour comparaison, il existe d'autres claviers virtuels activés par des IC, mais ceux-ci permettent d'écrire une lettre toutes les une à deux minutes environ.

Aujourd'hui, les interfaces cérébrales ne sont donc plus une pure spéculation de la science-fiction, même si nous ne nous trouvons qu'au tout début des recherches. Les personnes souffrant de dysfonctionnements physiques sévères pourront ces prochaines années augmenter leurs capacités d'interaction avec les machines par l'intermédiaire d'une modulation consciente de l'activité cérébrale, ceci après une courte période d'apprentissage. Il s'agit d'avancer dans les trois disciplines qui confluent ici, à savoir les neurosciences, l'ingénierie biomédicale et l'informatique. Il faut approfondir nos connaissances des phénomènes cérébraux liés à la prise de décision consciente, développer des techniques pour extraire le maximum d'information des EEG et améliorer les méthodes d'apprentissage statistique pour rendre le classifieur plus robuste. Notre groupe de recherche à l'IDIAP travaille dans ces directions dans le cadre du pôle de recherche national sur le traitement multimodal IM2 et le projet européen MAIA³, en collaboration avec plusieurs partenaires suisses et européens.

José del R. Millán, dr ing. en informatique
IDIAP Research Institute, Rue du Simplon 4, CH - 1920 Martigny

Références

- [1] MILLÁN, J. DEL R., RENKENS, F., MOURIÑO, J. AND GERSTNER, W. (2004): « Brain-actuated interaction », *Artificial Intelligence*, 159, pp. 241-259
- [2] MILLÁN, J. DEL R., RENKENS, F., MOURIÑO, J., AND GERSTNER, W. (2004): « Non-invasive brain-actuated control of a mobile robot by human EEG », *IEEE Trans. Biomedical Engineering*, 51, pp. 1026-1033
- [3] Science's News Focus (2003): « Tapping the mind », *Science*, 299, pp. 496-499

³ Voir respectivement <<http://www.im2.ch>> et <<http://www.maia-project.org>>