

Une interface cerveau-ordinateur (ICO) est un système visant à différencier plusieurs états mentaux d'un utilisateur pour les traduire en commandes transmises à un dispositif externe. Une catégorie d'ICO, appelée ICO réactive, utilise les réponses automatiques du cerveau provenant d'une stimulation sensorielle de l'utilisateur pour différencier plusieurs états mentaux. Un potentiel évoqué est la manifestation sous la forme d'une variation du potentiel électrique de la réponse du cerveau. Notre travail se concentre sur les potentiels évoqués apparaissant dans le cortex somatosensoriel, aussi appelé cortex somesthésique. Une action mécanique appliquée sur la peau évoque une réponse cérébrale spécifique dans le cortex somesthésique primaire contralatéral à la stimulation, qui est appelée potentiel évoqué somesthésique (PES) et mesuré à l'aide d'électroencéphalographie (EEG) de surface. Lorsque l'action mécanique est périodique et maintenue, comme c'est le cas lors d'une vibration, le PES est également périodique avec la même fréquence, il est alors appelé PES stationnaire (PESS).

Des activités mentales spécifiques, telles que la focalisation attentionnelle, modulent l'amplitude et/ou la phase du PESS. Cette modulation volontaire constitue un marqueur significatif de l'activité mentale communément utilisé dans les ICOs exploitant des PESSs. Dans cette thèse, nous étudions un nouveau marqueur basé sur le filtrage somesthésique du cortex. Le filtrage somesthésique est la capacité du cortex à filtrer les stimuli non pertinents ou répétitifs reçus par le système somatosensoriel, dans notre cas, issus des récepteurs mécaniques de la peau.

Dans cette thèse, nous étudions chaque étape d'une boucle d'interaction utilisant une ICO combinant PESS et IM, ainsi que les caractéristiques des PESSs et les contraintes méthodologiques résultant de leur utilisation. Nous étudions les aspects théoriques du PESS sur des données synthétiques afin d'identifier le traitement du signal adéquat pour notre application. Nous évaluons les aspects humains liés à l'interaction avec notre système. Nous nous concentrons également sur la relation entre la performance de l'ICO et l'utilisabilité ressentie du système ou la charge mentale de l'utilisateur.

Enfin, nous souhaitons que notre système soit utilisable par des individus affectés par un handicap moteur sévère, comme les personnes en situation d'enfermement disposant toujours du sens du toucher. L'approche somatosensorielle a été choisie car elle exploite le sens du toucher de l'utilisateur. En outre, contrairement à la focalisation attentionnelle, l'imagerie motrice peut facilement être réalisée avec plusieurs membres à la fois. Cette propriété de l'imagerie motrice nous a conduits à choisir une combinaison liant PESS et IM car elle pourrait augmenter le nombre de commandes disponibles pour notre système ICO.

Première contribution

Nous passons en revue la littérature sur les PESSs et leur utilisation dans les ICOs utilisant l'EEG. Cette revue nous permet de décrire les principales caractéristiques des PESS. De plus, l'analyse des protocoles de calibration standards permettant de définir la fréquence de stimulation qui maximise l'amplitude des PESSs nous permet d'identifier et d'intégrer cette procédure à notre protocole. Ensuite, nous présentons les algorithmes standards en traitement du signal et en classification des données, ainsi que les performances de classification obtenues. En outre, l'amplitude des PESS à une fréquence de stimulation spécifique dépend fortement de l'individu, et aucune tendance dans les distributions ne semble émerger. Par conséquent, nous insistons sur le fait qu'une procédure de calibration doit être effectuée pour obtenir une stimulation qui maximise l'amplitude des PESSs. Cette première contribution a été valorisée par une publication dans un journal à comité de lecture international: *Journal of Neural Engineering*.

Deuxième contribution

Nous avons complété les résultats de la revue de la littérature en comparant plusieurs méthodes de traitement du signal pour estimer l'amplitude d'une oscillation sinusoïdale ciblée, *i. e.* les PESSs. Nous introduisons tout d'abord un modèle de formation d'EEG de surface adapté au cas spécifique d'une ICO exploitant les PESSs. Notre modèle considère un mélange de sources sinusoïdales d'intérêt et suppose une conduction volumique constante de la tête.

Nous mesurons ensuite, sur les EEG synthétiques, la précision de l'estimation de l'amplitude des PESSs par des algorithmes de traitement du signal couramment utilisés dans les ICOs. Nous étendons notre comparaison aux données EEG recueillies lors de nos expériences. Nos résultats montrent que le filtre spatial *current source density* combiné à une technique simple de démodulateur synchrone est la méthode la plus efficace par rapport à un filtre laplacien de faible étendue ou à des méthodes auto-adaptatives telles que l'analyse de corrélation canonique. Cette dernière est désormais le standard des ICOs utilisant les potentiels évoqués visuels stationnaires ou PEVSs*.

* comme un PESS, un PEVS est une augmentation de l'oscillation de l'activité cérébrale due à l'observation de stimulus clignotants. L'amplitude de l'oscillation augmente à la fréquence du stimulus sur le lobe occipital.

Troisième contribution

Nous décrivons en détail le protocole mis en place pour la procédure de calibration et la session de mesure de la taille d'effet du filtrage somesthésique. Plus précisément, nous mesurons l'effet du filtrage somesthésique dans une situation d'IM avec un ou deux bras lorsque le sujet reçoit des stimulations vibro-tactiles multiples. En accord avec les défis sous-jacents aux ICOs, concernant la contamination des données,

nous proposons un protocole pour réduire le bruit dans les données. Nous testons notre hypothèse principale de “sélectivité” de la modulation d’un PESS en fonction du contenu de l’IM. En d’autres termes, l’IM effectuée avec le bras droit a-t-elle un impact uniquement sur le PESS résultant du même bras ? Cette hypothèse semble nécessaire pour mettre en place avec succès une ICO permettant d’obtenir plus de commandes qu’elle n’utilise de stimulations.

Nous cherchons également à classer les états d’IM en utilisant uniquement la variation d’amplitude du PESS. Nous essayons également de réaliser une classification à 2 classes visant à différencier l’intention de mouvement, c’est-à-dire à reconnaître l’état de repos et un de nos états d’IM. Ces résultats sont cependant peu concluants et nous proposons plusieurs pistes de recherche pour améliorer les performances de la classification.

Quatrième contribution

Enfin, nous proposons et étudions deux applications contrôlées par ICO qui diffèrent sur deux aspects fondamentaux. La première est plus punitive en cas d’erreur, et la seconde implique l’inertie. Nous mesurons l’influence de ces facteurs à l’aide d’un protocole utilisant des retours d’informations fictives, ce qui signifie que la performance de classification est fixée à des valeurs spécifiques. Nous introduisons un modèle de la relation entre la performance de classification et l’utilisabilité perçue du système. Par ailleurs, les travaux de Bangor *et al.*¹ fournissent un modèle de la relation entre l’utilisabilité perçue d’un système et son acceptabilité. Notre modèle nous permet, en extrapolant à partir des travaux de Bangor *et al.*, de prédire la performance de classification nécessaire pour atteindre un système “acceptable” pour chaque application. Nos résultats ont été valorisés par une publication et présentation lors d’une conférence internationale: *International Conference on Human Interaction & Emerging Technologies – IHIET 2022*.

¹ Aaron Bangor, Philip T. Kortum, and James T. Miller. “An Empirical Evaluation of the System Usability Scale.” *International Journal of Human–Computer Interaction* 24.6 (July 2008). Number: 6 Publisher: Taylor & Francis, pp. 574–594. issn: 1044-7318. doi: 10.1080/10447310802205776.