

Sujet de thèse, équipe BCI, Laboratoire CRISTAL

Univ. Lille 2022 - 2023

Étude d'une interface cerveau-ordinateur multimodale pour l'amélioration du brain-switch

(Study of a multimodal brain-computer interface for brain-switch improvement)

- Thèse de doctorat 2023-2026 en informatique
- Lieu : Lille (CRISTAL, CNRS, Université de Lille, à Villeneuve d'Ascq), équipe BCI
- Directeur de thèse : José Rouillard (MdC HDR, CRISTAL, BCI, Université de Lille)
- Financement : Bourse de l'université de Lille (en cours de demande)
- Mots clés : interface cerveau-ordinateur, multimodalité, santé, handicap

Résumé du sujet de thèse :

Cette thèse se propose d'explorer la fusion et la fission de modalités d'interaction, en entrées comme en sortie du système, dans le cadre d'une BCI multimodale, pour permettre à des patients lourdement handicapés de communiquer au mieux, selon le contexte d'usage détecté (cf. capacités cognitives et physiques du patient, tâche à accomplir, etc.). L'idée principale réside dans le fait de proposer une BCI non invasive (EEG) couplée à d'autres modalités d'interaction (voix, geste, toucher...) en input et en output, en ciblant un usage plus robuste et plus précis.

Le changement de modalité pourra se faire au cours de l'interaction, contrairement aux autres solutions proposées dans la littérature, où l'on fixe à l'avance les moyens de communiquer avant chaque session d'interaction. Un « brain-switch » permettra de faire basculer le système informatique d'un état « non réceptif » à un état « réceptif » des commandes, à l'initiative de l'utilisateur. Cela permettra de réduire les faux positifs qui interviennent lorsque la machine croit déceler une intention d'action de la part de l'utilisateur alors que ce n'est pas le cas (et inversement ; cf. notions de True Positive Rate et False Positive Rate).

Le challenge est de proposer une BCI multimodale plus simple et plus adaptative, volontairement orientée vers les besoins des utilisateurs (cf. user-centred design au sens de Jakob Nielsen ; la machine s'adapte à l'humain au cours de l'interaction) ; contrairement à la majorité des approches classiques, qui se focalisent sur la partie « traitement du signal » [Lotte et al. 2007], en délaissant les aspects ergonomique et utilisabilité du système, que nous considérons comme tout aussi importants.

1) Contexte scientifique et économique :

Malgré les progrès accomplis dans le domaine des BCI, mettre en œuvre une interface cerveau-ordinateur efficace et utilisable au quotidien est un réel défi scientifique et technologique. Depuis les premiers travaux de Jacques Vidal, dans les années 70, de nombreuses études ont montré la faisabilité technique d'une BCI en fonction de diverses approches possibles (P300, imagerie motrice, etc.).

Néanmoins, on constate toujours un fort besoin d'apprentissage de la part de l'utilisateur avant de pouvoir maîtriser l'interface BCI proposée, avec un niveau de précision supérieur à la chance¹. Par ailleurs, on note souvent une rapide et grande fatigabilité des patients qui doivent faire des efforts cognitifs supplémentaires pour suivre les protocoles imposés (ex : imaginer faire tel mouvement, compter telle occurrence, etc.). Pour des patients handicapés qui ont un besoin crucial de communication, au quotidien, aucune solution simple, efficace, et facilement adaptable à leurs capacités n'est encore disponible.

Le concept de "brain-switch" [Barachant et al. 2011] permet d'activer ou de désactiver les états de contrôle et de non-contrôle dans un système BCI, un peu comme un interrupteur électrique (On/Off). Dans la littérature, un "brain-switch" est qualifié d'endogène (80% des cas, dans l'étude de [Han et al. 2020]) ou d'exogène, selon qu'il se fait, respectivement, via une activité cérébrale interne (comme une imagerie mentale) ou bien via une activité cérébrale évoquée par un stimulus externe (visuel, auditif, tactile). Il peut être exploité dans une BCI synchrone ou asynchrone : dans le premier cas, la machine s'attend à recevoir une information dans une plage temporelle prévue (ex : plage de 10 secondes) ; tandis que dans le second cas, l'utilisateur choisit librement le moment de l'interaction.

Nous préconisons dans cette thèse l'étude d'un brain-switch asynchrone, exogène.

Comme le suggère la conclusion d'une récente revue de littérature [Han et al. 2020] (« *Therefore, a multimodal-based approach can be a solution to improve the performance of brain-switches.* »), une approche multimodale pourrait améliorer les performances des BCI dans leur ensemble. Pour avancer dans cette voie, certains chercheurs travaillent sur le couplage du signal acquis simultanément selon différentes modalités (électroencéphalogramme (EEG) et magnétoencéphalogramme (MEG), par exemple) [Corsi et al. 2018].

Dans le cadre de cette thèse, la multimodalité sera étudiée du point de vue de l'utilisateur. Nous pensons en effet que l'usage d'interfaces multimodales [Coutaz et al. 95] appliquées au champ des BCI pourrait également apporter des solutions plus pertinentes notamment en termes d'utilisabilité.

2) L'état du sujet dans le laboratoire d'accueil :

L'équipe BCI du laboratoire CRISTAL s'intéresse notamment aux interfaces cerveau-ordinateur pour patients souffrants de lourds handicaps et/ou de maladies les empêchant d'utiliser des IHM classiques pour communiquer et agir sur le monde. Nous collaborons depuis de nombreuses années avec divers organismes dans le domaine de la santé (CHU de Lille, INSERM, laboratoire SCALAB...) afin d'étudier conjointement des solutions dans lesquelles des BCI non invasives sont utilisées. Les thèses d'Alban Duprès (2013-2016) [Duprès 2016] et de Jimmy Petit (2019-2022) [Petit 2022] ont permis d'avancer dans l'étude de BCI hybrides multimodales et l'exploitation des potentiels évoqués somesthésiques (vibration sur les poignets). Le présent sujet de thèse continue à explorer ces pistes de recherche, en tentant de consolider les acquis (BCI hybrides et usage des SSSEP, notamment) tout en explorant

¹ *Si ces technologies semblent aussi puissantes, pourquoi les interfaces cerveau machine ne sont-elles pas utilisées plus couramment aujourd'hui ? Une raison simple : elles ne fonctionnent pas à tous les coups. Le taux de performance de ces interfaces est d'environ 60 à 70%. Autrement dit, elles échouent dans 30 à 40% des cas. Une grande disparité est également observée entre les sujets, certains réussissant du premier coup avec un taux de performance à 100%, d'autres mettant beaucoup plus de temps à utiliser efficacement la technologie. Cette différence fait qu'aujourd'hui, il est très difficile d'utiliser couramment ces interfaces.* [Source : <https://institutducerveau-icm.org/fr/actualite/approche-multimodale-optimiser-interfaces-cerveau-machine/>]

d'autres pistes encore peu exploitées, comme l'usage de différentes modalités d'interactions (visuelle, auditive, kinesthésique) au cours d'une même session, pour tenter, dynamiquement (sans changer le montage d'électrodes sur le scalp) d'obtenir un brain-switch personnalisé et évolutif.

3) Objectifs visés et résultats escomptés :

Les objectifs visés sont la modélisation et la réalisation d'une interface cerveau-ordinateur multimodale (voix, geste, EEG...) permettant de mettre en œuvre un brain-switch robuste et efficace, pour des actions simples (allumer/éteindre tel appareil) ou permettant d'envoyer des messages électroniques (soignants, familles, amis...). Il s'agit de modéliser et de concevoir, dans un cycle de développement en spirale, une solution de dialogue humain-machine véritablement utilisable pour des personnes affectées par un handicap moteur sévère, et ne pouvant plus utiliser une seule modalité d'interaction unique. L'interaction par BCI sera une des solutions potentielles, à coupler avec d'autres moyens d'interagir, adaptables selon l'utilisateur, la session, le contexte, etc. Un démonstrateur transportable sera privilégié, afin de pouvoir tester l'utilisabilité des solutions en dehors du laboratoire, si possible (cf. Regroupement d'établissements sanitaires et médico-sociaux comme la fondation Hopale² de Berck, par exemple).

4) Programme de travail prévisionnel :

❖ Première année :

- État de l'art : Une étude bibliographique sera conduite par le/la candidat(e) afin de recenser l'état de l'art du domaine, tant sur l'aspect traitement du signal du BCI, que sur l'aspect ergonomique des solutions actuellement proposées. Typiquement, nous savons par exemple qu'un SSVEP est certes relativement facile à détecter sur la partie occipitale du crâne, mais que justement, pour des patients alités, cette solution est difficile voire impossible à mettre en œuvre, au quotidien, qu'elle entraîne une fatigue du patient assez rapidement, ce qui conduit donc à de moindres performances, et *in fine*, à une communication moins efficace.

- Étude d'usage : Le/la candidat(e) devra ensuite se renseigner auprès de nos partenaires (Hub Santé, fondations et organismes de Santé, maisons médicalisées, etc.) à propos des usages et des technologies actuellement utilisés pour aider les utilisateurs à mobilité réduite et/ou utilisateurs dits « empêchés » (suite à un AVC, un accident, une maladie évolutive...) à effectuer diverses tâches, avec et sans l'aide d'un système informatisé (communiquer, demander de l'aide ponctuelle, de l'aide d'urgence, etc.). Le rapport détaillé de cette étude d'usage devra proposer des pistes pour choisir le type d'application à concevoir et développer, en fonction des modalités et du type de brain-switch choisis. L'étude de [Han et al. 2020] explique que les chercheurs utilisent dans leurs études quatre grandes familles de déclencheurs³ pour le brain-switch, allant du simple seuil numérique de déclenchement à une vérification multiple occurrences dans un laps de temps donnée. Un compromis devra être fait entre, d'une part, limiter le nombre de faux positifs (déclenchement intempestif d'une commande non voulue de la part de l'utilisateur) et d'autre part, limiter le nombre de vérification du déclencheur de ladite commande, sans quoi, le temps et l'énergie nécessaire pour communiquer seraient inévitablement augmentés.

² <http://www.fondation-hopale.org>

³ There are four different types of detection algorithms used: (i) a simple threshold method, (ii) a classifier-based threshold method, (iii) a classifier-based template matching method, and (iv) a classifier-based threshold-free method.

❖ Deuxième année :

- Modélisation du système : cette étape permettra de modéliser la manière d'utiliser des modalités d'interactions différentes au sein d'un même système informatique et de définir le type de Brain-Switch à mettre en œuvre dans l'étude. En outre, il faudra proposer une méthode permettant de passer rapidement, d'un type de détection à un autre, au cours de la même session, sans avoir à repositionner les électrodes. Par exemple, il faut détecter une activité sur les lobes temporaux lorsqu'on sollicite une modalité auditive, occipitaux, pour une activité visuelle, et centraux pour une activité motrice.

- Protocole d'étude : le/la doctorant(e) sera accompagné(e), durant cette phase, pour la rédaction et le dépôt de dossiers auprès du Comité d'Éthique de la Recherche (CER) et pour la Protection des Personnes (CPP).

- Étude préliminaire en laboratoire : Une étude préliminaire permettra, selon la technique de Magicien d'Oz, de simuler les prétendues réponses du système et d'étudier ainsi les attendus des utilisateurs en terme de canaux de communication à mettre à disposition, des usages de la multimodalité (alternée, séquentielle, synergique...), de l'adéquation et de la pertinence des outils à programmer en fonction de la tâche à réaliser (degré de liberté nécessaire, temps de réponse maximum toléré par l'utilisateur, etc.).

Le/la candidat(e) devra proposer des modèles et solutions pour des cas plus complexes de communication (questions/réponses, dialogues avec la machine...) en veillant à l'ergonomie et à la facilité d'usage de ces BCI multimodales, basées sur plusieurs sens humains (vue, ouïe, toucher...), et qui devront donc s'adapter selon divers critères (cf. notion de plasticité, de multimodalité et multicanalité des IHM [Rouillard 2018]).

- Développement :

Le brain-switch qui sera ensuite développé permettra, dans un premier temps, le pilotage d'appareils dans un environnement domotisé (allumer/éteindre lumière, etc.), dans une salle d'interaction de notre laboratoire. Cela permettra de valider les concepts et de confirmer l'efficacité et les performances des interfaces multimodales proposées, sur une population d'individus témoins, sans handicap particuliers. Les outils et langages de programmation couramment utilisés dans notre laboratoire sont les suivants : OpenVibe, Unity, C#, Matlab, Python... ; avec amplificateurs gTec, casque à 16 électrodes, capteur d'ondes cérébrales Unicorn hybrid black sans fil, vibrotacteur C2-Factors, etc.

❖ Troisième année :

- Expérimentation :

Une expérimentation en laboratoire permettra de récolter des données et de vérifier si les hypothèses scientifiques avancées seront validées ou rejetées. Idéalement, une campagne d'expérimentation à l'extérieur du laboratoire sera menée (fondations médicalisées, domicile de patients...) afin de tester la portabilité et l'utilisabilité des solutions proposées.

- Publications et diffusion :

Les résultats ainsi obtenus pourront être soumis à des conférences nationales, internationales et des revues scientifiques du domaine (IHM, CHI, TOCHI, etc.), tout au long de la thèse, pour permettre la diffusion des connaissances acquises au cours de cette étude.

Rédaction de la thèse et préparation du projet professionnel de l'étudiant(e).

5) Candidature et compétences recherchées :

Le candidat retenu doit être titulaire d'un Master M2 ou équivalent en informatique et devra montrer un grand intérêt à effectuer des recherches de haute qualité. Le candidat doit justifier d'une expérience ou d'un intérêt marqué dans le développement logiciel (Python, C#, JS, Firebase, Unity...) et les interactions humain-machine. Des aptitudes en traitement du signal (EEG, EMG, etc.), fusion/fission de données et multimodalité seront un plus. Créativité, autonomie, esprit d'équipe et sens de la communication sont des atouts précieux. Un bon niveau d'anglais technique et scientifique sera également apprécié. Si ce projet vous intéresse, merci d'envoyer un e-mail le plus tôt possible à jose.rouillard@univ-lille.fr avec CV, relevés de notes ainsi que tout élément permettant d'apprécier votre candidature.

6) Références :

[Barachant et al. 2011] Alexandre Barachant, Stéphane Bonnet, Marco Congedo, Christian Jutten. A Brain-Switch using Riemannian Geometry. BCI 2011 - 5th International Brain-Computer Interface Conference, Sep 2011, Graz, Austria. pp.64-67. hal-00629110

[Corsi et al. 2018] Corsi MC, Chavez M, Schwartz D, Hugueville L, Khambhati AN, Bassett DS, De Vico Fallani F. Integrating EEG and MEG Signals to Improve Motor Imagery Classification in Brain-Computer Interface. *Int J Neural Syst.* 2019 Feb;29(1):1850014. doi: 10.1142/S0129065718500144. Epub 2018 Apr 2. PMID: 29768971.

[Coutaz et al. 1995] Coutaz, J., Nigay, L., Salber, D., Blandford, A., May, J., & Young, R.M. (1995). Four easy pieces for assessing the usability of multimodal interaction: the CARE properties. *INTERACT.*

[Duprès 2016] Duprès Alban. Interface cerveau-machine hybride pour pallier le handicap causé par la myopathie de Duchenne. Thèse de doctorat. Traitement du signal et de l'image. Université Lille 1 - Sciences et Technologies, 2016. Français. tel-01411217

[Duprès et al. 2019]

Toward a hybrid brain-machine interface for palliating motor handicap with Duchenne muscular dystrophy: A case report. Alban Duprès, François Cabestaing, José Rouillard, Vincent Tiffreau, Charles Pradeau *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, Elsevier Masson, 2019, [10.1016/j.rehab.2019.07.005](https://doi.org/10.1016/j.rehab.2019.07.005)

[Han et al. 2020] Han, Chang-Hee, Klaus-Robert Müller, and Han-Jeong Hwang. 2020. "Brain-Switches for Asynchronous Brain-Computer Interfaces: A Systematic Review" *Electronics* 9, no. 3: 422. <https://doi.org/10.3390/electronics9030422>

[Lotte et al. 2007] Fabien Lotte *et al.*, 2007, *J. Neural Eng.*, 4 R1, DOI 10.1088/1741-2560/4/2/R01

[Petit 2022] Petit, Jimmy, Filtrage somesthésique pour des interfaces cerveau-ordinateur utilisant des stimulations vibro-tactiles, Thèse de doctorat, Université Lille, 2022. Anglais.

[Petit et al. 2021] Petit Jimmy, Rouillard José, Cabestaing François, EEG-based Brain-Computer Interfaces exploiting Steady-State Somatosensory-Evoked Potentials: A Literature Review. *Journal of Neural Engineering*, IOP Publishing, 2021, 18 (5), pp.051003. [10.1088/1741-2552/ac2fc4](https://doi.org/10.1088/1741-2552/ac2fc4). [hal-03461928](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03461928)

[Rouillard 2008] Rouillard José, Adaptation en contexte : contribution aux interfaces multimodales et multicanal, Habilitation à Diriger les Recherches (HDR) de l'université des Sciences et Technologies de Lille1, 2008.