

TITRE DU PROJET (limité chacun à 255 caractères) : Le rôle de la prédiction sensorimotrice dans l'apprentissage moteur.

1) Renseignements administratifs sur la direction de thèse¹ (1 page maximum) :

Directeur de thèse HDR :

Nom : Papaxanthis

Prénom : Charalambos

Section CNU : 74 STAPS

Grade : Professeur des Universités

HDR : Date de soutenance 29/06/2004 Discipline : Neurosciences-STAPS

L'HDR devra être soutenue, ou sa soutenance autorisée, au moment du dépôt du présent projet.

Coordonnées (adresse, courriel, téléphone) : UFR STAPS, Campus Universitaire, BP 27877, F-21078, Dijon France, 0380396748. charalambos.papaxanthis@ube.fr

Unité d'appartenance (intitulé, label, n°, directeur) : INSERM CAPS UMR1093. Directeur : C. PAPAXANTHIS

Co-directeur de thèse éventuel :

Nom : Dupont

Prénom : William

Section CNU : 74 STAPS

Grade : Maître de conférences

HDR : non ☒ ; oui ☐ Date de soutenance..... Discipline :

Coordonnées (adresse, courriel, téléphone) : UFR STAPS, Campus Universitaire, BP 27877, F-21078, Dijon France, 0380396761. william.dupont@ube.fr

Unité d'appartenance (intitulé, label, n°, directeur) : INSERM CAPS UMR1093. Directeur : C. PAPAXANTHIS

2) Descriptif du projet de thèse (devra inclure les rubriques suivantes) :

Nom et label de l'unité de recherche (ainsi que l'équipe interne s'il y a lieu) : Laboratoire INSERM UMR1093 – Cognition, Action et Plasticité Sensorimotrice

Localisation :

3 allées des stades universitaires, UFR STAPS, Université Bourgogne Europe, Dijon, 21000

Nom du directeur de thèse : PAPAXANTHIS Charalambos (PU)

Nom du co-directeur : DUPONT William (MCU)

Adresse courriel du contact scientifique : charalambos.papaxanthis@ube.fr

¹ ATTENTION : selon l'article 16 de l'arrêté du 25 mai 2016, le total d'encadrants ne peut pas dépasser 2, sauf si l'un des encadrants appartient au monde socio-économique, qui peut venir en sus, ou en cas de co-tutelle; Le décompte des co-encadrements se fera au prorata du nombre d'encadrants : 1 pour 1 encadrant, ½ pour deux encadrants.

Titre du projet : Le rôle de la prédiction sensorimotrice dans l'apprentissage moteur.

Description du projet (2 pages maximum) :

L'imagerie motrice se définit comme la simulation mentale d'un mouvement, réalisée en l'absence de toute exécution motrice effective¹. De nombreuses études ont démontré que cette simulation mentale de mouvement mobilise des aires cérébrales largement similaires à celles activées lors de l'exécution réelle du mouvement²⁻⁴. En raison de ses effets bénéfiques sur la performance (^{5,6}), l'imagerie motrice a progressivement été intégrée dans les domaines sportif et clinique, notamment pour optimiser les performances motrices et soutenir les programmes de rééducation^{7,8}. Ainsi, ces vingt dernières années ont été marquées par un intérêt croissant pour l'analyse comparative des effets de la pratique physique et de la pratique mentale sur la performance motrice, en particulier dans des tâches caractérisées par un compromis vitesse-précision.

Lorsqu'un mouvement réel exigeant à la fois rapidité et précision doit être appris ou perfectionné, les essais sont rarement exempts d'erreurs. Dans une perspective d'apprentissage fondé sur l'erreur, ces écarts entre le mouvement produit et le mouvement attendu constituent une source d'information essentielle, permettant d'ajuster la commande motrice lors des tentatives ultérieures. Une hypothèse dans la littérature est que cet ajustement repose sur l'activité de réseaux neuronaux appelés contrôleurs et modèles internes prédictifs. Concrètement, en fonction du mouvement désiré et des conditions initiales du système, le contrôleur élabore une commande motrice. Parallèlement à sa transmission vers l'effecteur, une copie de cette commande, appelée copie d'efférence, est envoyée aux modèles internes prédictifs. À partir de cette copie et des conditions initiales, le modèle interne génère une prédiction des conséquences sensorielles et dynamiques associées au mouvement^{9,10}. Ce cadre théorique semble transposable à la pratique mentale, dans la mesure où l'imagerie motrice mobiliserait ces modèles internes prédictifs afin d'anticiper les conséquences sensorielles des mouvements imaginés¹¹. In fine, l'amélioration de l'habileté motrice, caractérisée par une meilleure précision et une plus grande rapidité dans des tâches de séquences motrices après les pratiques physique et mentale pourrait s'expliquer par ce mécanisme prédictif, ainsi que par l'ajustement et l'affinement progressifs des prédictions au fil de l'entraînement.

Toutefois, la mise en évidence de ces mécanismes de modèles internes prédictifs à la suite de pratique mentale demeure essentiellement indirecte. Elle repose, par exemple, sur des mesures subjectives (questionnaires) ou sur des modifications neurophysiologiques, telles que des changements d'activité ou de connectivité entre le cervelet et le cortex moteur primaire¹². **L'un des premiers objectifs de cette thèse** consiste ainsi à tester directement l'existence d'un lien entre prédiction sensorimotrice et apprentissage moteur. Pour ce faire, nous utiliserons un paradigme d'atténuation sensorielle impliquant la prédiction sensorimotrice et examinerons si l'ampleur de l'apprentissage moteur dépend de cette variable. Au cours de cette première étude, la stimulation magnétique transcrânienne (SMT) et l'électroencéphalographie (EEG) seront mobilisées afin d'identifier et de caractériser les corrélats neuronaux associés aux modifications comportementales observées.

Néanmoins, il importe de souligner que la capacité à générer des simulations mentales et motrices n'est pas homogène et présente des variations interindividuelles marquées. À cet égard, on distingue, d'une part, l'hyperphantasie, caractérisée par une imagerie mentale d'une vivacité et d'un niveau de détail exceptionnellement élevés, parfois décrite comme quasi perceptive. D'autre part, l'aphantasie désigne la condition de

personnes rapportant une incapacité totale ou partielle à former des images mentales d'objets ou d'événements (en l'absence de troubles neurologiques identifiables dans le cas de l'aphantasie congénitale^{13–15}). Ainsi, **un autre aspect important que nous aborderons dans cette thèse** est déterminer si la capacité d'imagerie motrice influence l'implication de ces modèles prédictifs et de ces réseaux neuronaux au cours d'un apprentissage moteur basé sur des pratique physiques et mentales.

Enfin, **le dernier objectif de cette thèse** consiste à examiner si l'utilisation d'une technique de neuromodulation (SMTr), permet de faciliter la génération de simulations motrices chez des participants présentant une aphantasie. Nous chercherons également à déterminer si une éventuelle amélioration de cette capacité de simulation mentale se répercute sur leurs performances en matière de prédiction sensorimotrice et d'apprentissage moteur à la suite d'une pratique mentale. Des mesures comportementales et neurophysiologiques, combinant stimulation magnétique transcrânienne et électroencéphalographie (SMT-EEG), seront également mises en œuvre au cours de cette dernière étude afin de caractériser les mécanismes sous-jacents.

1. Decety, J. (1996). The neurophysiological basis of motor imagery. *Behavioural Brain Research* 77, 45–52. [https://doi.org/10.1016/0166-4328\(95\)00225-1](https://doi.org/10.1016/0166-4328(95)00225-1).
2. Dupont, W., Madden-Lombardi, C., Perrone-Bertolotti, M., Palluel-Germain, R., and Lebon, F. (2025). The role of the motor system in action imagination and comprehension. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 178, 106392. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2025.106392>.
3. Hardwick, R.M., Caspers, S., Eickhoff, S.B., and Swinnen, S.P. (2018). Neural correlates of action: Comparing meta-analyses of imagery, observation, and execution. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 94, 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2018.08.003>.
4. Héту, S., Grégoire, M., Saimpont, A., Coll, M.P., Eugène, F., Michon, P.E., and Jackson, P.L. (2013). The neural network of motor imagery: An ALE meta-analysis. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 37, 930–949. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.03.017>.
5. Ranganathan, V.K., Siemionow, V., Liu, J.Z., Sahgal, V., and Yue, G.H. (2004). From mental power to muscle power - Gaining strength by using the mind. *Neuropsychologia* 42, 944–956. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2003.11.018>.
6. Ruffino, C., Truong, C., Dupont, W., Bouguila, F., Michel, C., Lebon, F., and Papaxanthis, C. (2021). Acquisition and consolidation processes following motor imagery practice. *Scientific Reports* 11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81994-y>.
7. Ladda, A.M., Lebon, F., and Lotze, M. (2021). Using motor imagery practice for improving motor performance – A review. *Brain and Cognition* 150. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2021.105705>.
8. Malouin, F., Jackson, P.L., and Richards, C.L. (2013). Towards the integration of mental practice in rehabilitation programs. A critical review. *Front Hum Neurosci* 7, 576. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00576>.
9. Kawato, M., Kuroda, T., Imamizu, H., Nakano, E., Miyauchi, S., and Yoshioka, T. (2003). Internal forward models in the cerebellum: fMRI study on grip force and load force coupling. *Prog Brain Res* 142, 171–188. [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(03\)42013-X](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(03)42013-X).
10. Wolpert, D.M., and Flanagan, J.R. (2001). Motor prediction. *Current biology* 11, R729–R732.
11. Kilteni, K., Andersson, B.J., Houborg, C., and Ehrsson, H.H. (2018). Motor imagery involves predicting the sensory consequences of the imagined movement. *Nat Commun* 9, 1617. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03989-0>.
12. Rannaud Monany, D., Lebon, F., Dupont, W., and Papaxanthis, C. (2022). Mental practice modulates functional connectivity between the cerebellum and the primary motor cortex. *iScience* 25, 104397. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104397>.
13. Dupont, W., Papaxanthis, C., Lebon, F., and Madden-Lombardi, C. (2024). Mental simulations and action language are impaired in individuals with aphantasia. *Journal of Cognitive Neuroscience* 36, 261–271. https://doi.org/10.1162/jocn_a_02084.
14. Dupont, W., Papaxanthis, C., Madden-Lombardi, C., and Lebon, F. (2024). Explicit and implicit motor simulations are impaired in individuals with aphantasia. *Brain Communications* 6, fcae072. <https://doi.org/10.1093/braincomms/fcae072>.
15. Zeman, A., Dewar, M., and Della Sala, S. (2015). Lives without imagery - Congenital aphantasia. *Cortex* 73, 378–380. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.05.019>.

Financement du projet – partie Recherche (montants acquis, type de contrat) :

- Aucun financement autre que le contrat doctoral n'est prévu pour la rémunération du doctorant.
- Le laboratoire d'accueil dispose de tout le matériel nécessaire à la réalisation du projet.
- Consommables, informatique, petit matériel, congrès : financement acquis (financement récurrent INSERM et UBE).

Connaissances et compétences requises :

Le candidat devra avoir de bonnes connaissances en neurosciences, en neurophysiologie humaine et sur l'apprentissage moteur. Une familiarité avec des techniques de mesures neurophysiologiques (stimulation magnétique transcrânienne, EEG, EMG) sera appréciée.

Résumé en français et anglais (limité chacun à 1800 caractères)

Résumé en français

Une caractéristique remarquable de notre cerveau est sa capacité à créer des images mentales d'événements. L'imagerie motrice, définie comme la simulation mentale de mouvements sans exécution réelle, constitue une stratégie visant à optimiser la performance motrice, tant dans le domaine sportif que dans celui de la rééducation. Elle mobilise des réseaux neuronaux largement superposables à ceux engagés lors de l'exécution réelle, ainsi que des modèles internes prédictifs impliqués dans l'anticipation des conséquences sensorielles de l'action, ce qui permet l'apprentissage d'un mouvement.

Néanmoins, les capacités d'imagerie motrice présentent une variabilité interindividuelle marquée, allant de l'hyperphantasia (imagerie particulièrement vive) à l'aphantasia (altération, voire absence, de la capacité d'imagerie). À l'heure actuelle, les données empiriques demeurent insuffisantes pour établir de manière concluante l'existence d'un lien robuste entre prédiction sensorimotrice et apprentissage moteur par pratiques physique et mentale. De plus, l'influence de ces différences interindividuelles sur l'engagement des mécanismes prédictifs impliqués dans l'apprentissage moteur au cours d'un entraînement mental demeure largement inexplorée.

Ce travail vise à combler ces lacunes en examinant la relation entre prédiction sensorimotrice et apprentissage moteur, ainsi que l'influence des différents profils d'imagerie motrice sur la mobilisation des modèles internes prédictifs lors des pratiques physique et mentale. Des outils de pointe, tels que la stimulation magnétique transcrânienne (SMT), l'électroencéphalographie (EEG) et le couplage SMT-EEG, seront mobilisés afin de caractériser les différences d'activité neurophysiologique associées aux variations comportementales observées.

Résumé en anglais

A remarkable feature of our brain is its ability to create mental images of several events. Motor imagery, defined as the mental simulation of body movements without execution, is a promising approach for optimizing motor performance and rehabilitation strategies. This mental simulation of a movement engages neural networks that largely overlap with those involved in actual execution, notably through the activation of internal forward models that anticipate the consequences of actions.

Although the generation and use of mental simulations seem natural and common, motor imagery abilities show considerable interindividual variability, ranging from hyperphantasia (extremely vivid imagery) to aphantasia (severely impaired or even absent ability to generate mental images). To date, empirical evidence remains insufficient to establish a robust link between sensorimotor prediction and motor learning through mental practice. Furthermore, the influence of these interindividual differences of motor imagery ability on the

engagement of predictive mechanisms involved in motor learning during mental training remains largely unexplored.

This project aims to address these gaps by directly examining the relationship between sensorimotor prediction and motor learning, as well as the influence of these different motor imagery profiles on the recruitment of internal forward models during both physical and mental practice. Throughout the project, cutting-edge techniques such as transcranial magnetic stimulation (TMS), Electroencephalogram (EEG) recordings, and combined TMS-EEG approaches will be employed to characterize neurophysiological activity differences associated with the behavioral modulations.

Préciser le domaine de compétence dans la liste ci-dessous : 2 choix possibles maximum – les intitulés sont ceux d’ABG).

- **Psychologie, neurosciences**

Indiquez quelques mots clés concernant votre sujet): Apprentissage moteur, imagerie motrice, aphantasie, cognition, stimulation cérébrale non-invasive, enregistrement de l’activité cérébrale.

