

DIPLÔME NATIONAL DE DOCTORAT

(Arrêté du 25 mai 2016)

Date de la soutenance : **10 juillet 2025**

Nom de famille et prénom de l'auteur. e : **Monsieur Côme ANNICCHIARICO**

Titre de la thèse : Modélisation bayésienne des mécanismes d'apprentissage et d'échec dans l'entraînement par neurofeedback

Résumé



Les Interfaces Cerveau-Machine (ICM) suscitent un intérêt croissant, tant dans la communauté scientifique qu'auprès du grand public. De nombreuses ICM, notamment les systèmes de neurofeedback (NF), reposent sur la capacité des utilisateurs à apprendre à moduler certaines composantes de leur activité cérébrale à l'aide d'un signal de feedback (retour) en temps réel. Ces technologies offrent des perspectives prometteuses, en particulier dans le domaine thérapeutique. Toutefois, leur fiabilité limitée freine aujourd'hui leur déploiement à grande échelle. Cette instabilité s'explique par des causes multiples encore mal comprises. Parmi les sources majeures de variabilité figurent : la correspondance incertaine entre stratégies mentales et biomarqueurs neuronaux mesurables, la nature cachée des états mentaux et processus d'apprentissage de l'utilisateur, ainsi que les imprécisions et ambiguïtés dans la conception des tâches et du signal de feedback. Ces facteurs compliquent l'interprétation des résultats expérimentaux et nuisent à l'apprentissage de stratégies de régulation efficaces. De ce fait, il n'existe pas encore de consensus clair sur ce qui est réellement appris durant l'entraînement, sur les mécanismes de cet apprentissage, ni sur les facteurs expérimentaux qui influencent le plus les performances. A travers cette thèse, j'ai visé à combler ces lacunes en développant une compréhension quantitative de l'apprentissage en ICM à l'aide de modèles bayésiens, selon plusieurs axes complémentaires : (1) j'ai proposé une modélisation mathématique formelle de la boucle ICM, représentant la perception, la prise de décision et l'apprentissage comme des processus d'inférence bayésienne (active) ; (2) j'ai mené des simulations informatiques pour étudier les propriétés théoriques du modèle et formuler des hypothèses sur les facteurs limitant la performance ; (3) j'ai conçu et implémenté des tâches comportementales en ligne pour tester certaines hypothèses-clés sur l'apprentissage humain en contexte d'incertitude élevée ; (4) j'ai confronté ces modèles aux données issues d'entraînements ICM réels, afin d'expliquer les trajectoires d'apprentissage observées et d'identifier les sources de variabilité inter-individuelle. Ce travail fournit à la communauté scientifique du NF et des ICM une base de modèles computationnels permettant une caractérisation formelle, objective et quantitative de l'apprentissage. À terme, ces outils ouvrent la voie à des protocoles d'entraînement adaptatifs, personnalisés et optimisés pour chaque utilisateur.

Mots-clés : Inférence active,Modélisation,Interfaces Cerveau-Machine,Neurofeedback,