

**APPEL A PROJETS DE THÈSE 2026
CONCOURS DE L'ED 658 – Sciences du vivant**

Formulaire à compléter et déposer par les porteurs du projet de thèse HDR via l'adresse mail suivante :

ed658@univ-amu.fr OU/ET romane.haddadi@univ-amu.fr

MERCI DE METTRE EN SUJET DU MAIL : Concours ED 658 2026 porteur de projet

Ces dossiers seront publiés pour que les candidats postulent.

au plus tard le 3 mars 2026.

INTITULÉ DU PROJET

Neural and computational bases of goal-directed causal learning

1- Directrice ou directeur de thèse HDR

NOM	BROVELLI	Prénom	ANDREA
Téléphone portable	06 77 54 54 28	Courriel	ANDREA.BROVELLI@UNIV-AMU.FR
Unité de recherche (UR) de rattachement			
Code (acronyme et n°) de l'UR à AMU :		INT UMR 7289	
Nom de l'UR :	INSTITUT DE NEUROSCIENCES DE LA TIMONE		
Directrice ou directeur de l'UR			
Nom	CHAVANE	Prénom	FREDERIC

2- Codirectrice ou codirecteur de thèse, le cas échéant

NOM	DAUCÉ	Prénom	EMMANUEL
Téléphone portable	06 59 59 47 34	Courriel	edauce@gmail.com
Unité de recherche (UR) de rattachement			
Code (acronyme et n°) de l'UR à AMU :		INT UMR 7289	
Nom de l'UR :	INSTITUT DE NEUROSCIENCES DE LA TIMONE		
Directrice ou directeur de l'UR			
Nom	CHAVANE	Prénom	FREDERIC

SPECIALITE : (Rayer les mentions inutiles)

Neurosciences

SOUS JURY POUR LE CONCOURS : (Rayer les mentions inutiles)

JURY 3 : NEURSOCIENCES

APPEL A PROJETS DE THÈSE 2026 CONCOURS DE L'ED 658 – Sciences du vivant

MERCI DE REMPLIR TOUTES LES INFORMATIONS EN FRANÇAIS ET EN ANGLAIS

ENGLISH VERSION

Human agency depends on our capacity to form beliefs about action-outcome relationships, a faculty central to **causal learning**, rational decision-making, and social interaction. Goal-directed learning is driven by two complementary principles: reward maximisation, formalised in reinforcement learning models, and information maximisation, rooted in intrinsic motivation and Bayesian frameworks. Reward maximisation operates through extrinsic reward prediction errors (RPEs), encoded by midbrain dopaminergic neurons and propagated to the ventral striatum and prefrontal cortex. Information maximisation, by contrast, operates through information prediction errors reflecting unexpected information gain, which recruit overlapping dopaminergic and mesolimbic circuits and are broadcast to prefrontal reward networks via higher-order functional interactions. Despite these advances, the mechanisms by which **intrinsic** and **extrinsic** valuation signals are integrated during learning, and how prefrontal circuit dynamics support exploratory **information-seeking behaviour**, remain poorly understood. The goal of the PhD project is to understand the **neural** and **computational** bases of information seeking during goal-directed learning combining human intracranial EEG and computational models of active information seeking.

FRENCH VERSION

L'agentivité humaine repose sur notre capacité à former des croyances concernant les relations entre actions et résultats, une faculté centrale pour l'**apprentissage causal**, la prise de décision rationnelle et l'interaction sociale. L'apprentissage orienté vers les buts est régi par deux principes complémentaires : la maximisation de la récompense, formalisée dans les modèles d'apprentissage par renforcement, et la maximisation de l'information, ancrée dans la motivation intrinsèque et les cadres bayésiens. La maximisation de la récompense opère via des erreurs de prédiction de récompense (EPR) extrinsèques, encodées par les neurones dopaminergiques du mésencéphale et propagées vers le striatum ventral et le cortex préfrontal. La maximisation de l'information, en revanche, opère via des erreurs de prédiction d'information reflétant un gain d'information inattendu, qui recrutent des circuits dopaminergiques et mésolimbiques chevauchants et sont diffusées aux réseaux de récompense préfrontaux par le biais d'interactions fonctionnelles d'ordre supérieur. Malgré ces avancées, les mécanismes par lesquels les signaux de valuation **intrinsèques** et **extrinsèques** sont intégrés au cours de l'apprentissage, et la manière dont la dynamique des circuits préfrontaux soutient le comportement exploratoire de recherche d'information, restent mal compris. L'objectif du projet de doctorat est de comprendre les **bases neurales** et **computationnelles** de la **recherche d'information au cours de l'apprentissage** orienté vers les buts, en combinant l'EEG intracrânien humain et des modèles computationnels de recherche active d'information.

APPEL A PROJETS DE THÈSE 2026
CONCOURS DE L'ED 658 – Sciences du vivant

Keywords

Goal-directed learning, information seeking, frontal cortex, brain interactions, functional connectivity, intracranial EEG

Mots clés

Apprentissage orienté vers les buts, recherche d'information, cortex frontal, interactions cérébrales, connectivité fonctionnelle, EEG intracrânien

Theme / Field / Context

Context and positioning of the project in relation to the state of the art

Human agency rests on our ability to form beliefs about the consequences of our actions. This ability is central for the development of human causal learning and reasoning (Goddu and Gopnik 2024), and it provides the basis for rational decision-making, meaningful life and social interactions (Bandura 1997). Learning the **causal** relation between **actions** and **outcomes** is rooted in the balance between reward and information maximisation (Cohen et al. 2007) and it is supported by the so-called goal-directed system (Dolan and Dayan 2013). Despite major progress in the past decades, it is still largely unclear how intrinsic and informative values guide exploratory information-seeking behavior and how this process is supported by neural interactions in the prefrontal cortex.

Thématique / Domaine / Contexte

Contexte et positionnement du projet par rapport à l'état de l'art

L'agentivité humaine repose sur notre capacité à former des croyances concernant les conséquences de nos actions. Cette capacité est centrale pour le développement de l'apprentissage causal et du raisonnement chez l'humain (Goddu et Gopnik 2024), et elle constitue le fondement de la prise de décision rationnelle, d'une vie sociale et personnelle dotée de sens (Bandura 1997). L'apprentissage de la relation causale entre actions et résultats s'enracine dans l'équilibre entre la maximisation de la récompense et la maximisation de l'information (Cohen et al. 2007), et il est soutenu par ce que l'on appelle le système orienté vers les buts (goal-directed system) (Dolan et Dayan 2013). Malgré des avancées majeures au cours des dernières décennies, il reste largement incompris comment les valeurs intrinsèques et informatives guident le comportement exploratoire de recherche d'information, et comment ce processus est sous-tendu par les interactions neuronales dans le cortex préfrontal.

APPEL A PROJETS DE THÈSE 2026 CONCOURS DE L'ED 658 – Sciences du vivant

Objectives of the project and research hypotheses

The overarching objective of the PhD project is to understand the **neural** and **computational** bases of information seeking during goal-directed learning. The project bridges intrinsic and extrinsic valuation processes at **computational** and **neural** levels. Our goal is to link circuit architecture and neural dynamics with cognitive theories from Reinforcement Learning (RL) and Active Inference (AI), providing a unified view of how prefrontal networks support the computation, encoding, and broadcast of intrinsic and extrinsic learning signals.

Objectifs du projet et hypothèses de recherche

L'objectif général du projet de doctorat est de comprendre les bases neurales et computationnelles de la recherche d'information au cours de l'apprentissage orienté vers les buts. Le projet établit un pont entre les processus de valorisation intrinsèque et extrinsèque aux niveaux computationnel et neural. Notre objectif est de relier l'architecture des circuits et la dynamique neurale aux théories cognitives issues de l'Apprentissage par Renforcement (Reinforcement Learning, RL) et de l'Inférence Active (Active Inference, AI), en offrant une vision unifiée de la manière dont les réseaux préfrontaux soutiennent le calcul, l'encodage et la diffusion des signaux d'apprentissage intrinsèques et extrinsèques.

Methodology

Task 1 (cognitive modelling) aims to develop and validate computational models formalising the trade-off between extrinsic and intrinsic rewards, by comparing three theoretical frameworks — Active Inference, Expected Empowerment, and the Maximum Occupancy Principle — fitted to human behavioural data via Bayesian model comparison. Latent variables extracted from the best-fitting model will serve as regressors for neural analyses. **Task 2 (analysis tools)** aims to develop information-theoretic tools to characterise how neural oscillatory networks encode and broadcast learning signals, by extending information decomposition methods to phase relations between areas and adapting the Feature-Specific Information Transfer (FIT) metric to oscillatory data. **Task 3 (prefrontal circuits)** aims to determine how prefrontal cortical circuits encode and broadcast information-seeking signals in humans, using intracranial EEG recordings from participants performing a causal learning task (dataset already acquired). Intrinsic and extrinsic value signals will be mapped via high-gamma activity modulations, while interregional communication will be quantified through high-gamma co-modulations and phase synchronisation in lower-frequency bands, ultimately producing a functional map of prefrontal regions and their underlying cortico-cortical interactions.

Méthodes

La tâche 1 (modélisation cognitive) vise à développer et valider des modèles computationnels formalisant l'arbitrage entre récompenses extrinsèques et intrinsèques, en comparant trois cadres théoriques — l'Inférence Active, l'Empowerment Attendu et le Principe d'Occupation Maximale — ajustés aux données comportementales humaines via comparaison bayésienne de modèles. Les variables latentes extraites du modèle le plus performant serviront de régresseurs pour les analyses neurales. **La tâche 2 (outils d'analyse)** vise à développer des outils de théorie de l'information pour caractériser la manière dont les réseaux oscillatoires neuraux encodent et diffusent les signaux d'apprentissage, en étendant les méthodes de

APPEL A PROJETS DE THÈSE 2026 CONCOURS DE L'ED 658 – Sciences du vivant

décomposition de l'information aux relations de phase entre aires corticales et en adaptant la métrique de Transfert d'Information Spécifique aux Caractéristiques (FIT) aux données oscillatoires. **La tâche 3 (circuits préfrontaux)** vise à déterminer comment les circuits corticaux préfrontaux encodent et diffusent les signaux de recherche d'information chez l'humain, à partir d'enregistrements EEG intracrâniens de participants effectuant une tâche d'apprentissage causal (dataset existant). Les signaux de valeur intrinsèque et extrinsèque seront cartographiés via les modulations de l'activité haute-gamma, tandis que la communication interrégionale sera quantifiée par co-modulations haute-gamma et synchronisation de phase dans les bandes de basse fréquence, aboutissant à une carte fonctionnelle des régions préfrontales et de leurs interactions cortico-corticales sous-jacentes.

Références bibliographiques

- Bandura, Albert. 1997. *Self-Efficacy: The Exercise of Control*. (New York, NY, US) 604.
- Celotto, Marco, Jan Bím, Alejandro Tlaie, et al. 2023. "An Information-Theoretic Quantification of the Content of Communication between Brain Regions." In *bioRxiv.org*. June 14.
<https://doi.org/10.1101/2023.06.14.544903>.
- Cohen, Jonathan D., Samuel M. McClure, and Angela J. Yu. 2007. "Should I Stay or Should I Go? How the Human Brain Manages the Trade-off between Exploitation and Exploration." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 362 (1481): 933–942.
- Combrisson, Etienne, Ruggero Basanisi, Maelle C. M. Gueguen, et al. 2024. "Neural Interactions in the Human Frontal Cortex Dissociate Reward and Punishment Learning." *eLife* 12 (June).
<https://doi.org/10.7554/eLife.92938>.
- Combrisson, Etienne, Ruggero Basanisi, Matteo Neri, et al. 2025. "Higher-Order and Distributed Synergistic Functional Interactions Encode Information Gain in Goal-Directed Learning." *Nature Communications* 16 (1): 7179.
- Dolan, Ray J., and Peter Dayan. 2013. "Goals and Habits in the Brain." *Neuron* 80 (2): 312–325.

Conditions scientifiques matérielles et financières du projet de recherche

La thèse de doctorat s'intègre dans les projets scientifiques de l'équipe d'Andrea Brovelli et Emmanuel Daucé ([BrainNets](#) à l'INT). En particulier, elle viendra compléter des projets portant sur l'étude des interactions neurales au cours de l'apprentissage par renforcement (Combrisson et al., 2024) et du gain d'information (Combrisson et al., 2025). Elle s'intégrera également à un projet financé par Amidex, combinant des approches de la science des réseaux et de la théorie de l'information, afin d'élucider le rôle des interactions cortico-corticales d'ordre supérieur dans l'apprentissage causal orienté vers les buts (projet Hinteract). La thèse bénéficiera d'un financement de l'équipe BrainNets et d'Amidex.

Scientific, material, and financial conditions of the research project

APPEL A PROJETS DE THÈSE 2026 CONCOURS DE L'ED 658 – Sciences du vivant

The PhD thesis integrates within the scientific projects of the team of Andrea Brovelli and Emmanuel Daucé ([BrainNets](#) at INT). In particular, it will complement projects focusing on the study of neural interactions during reinforcement learning (Combrisson et al., 2024) and information gain (Combrisson et al., 2025). It will also integrate an Amidex funded project, combining network science approaches and information theory, to unravel the role of higher-order cortico-cortical interactions in goal-directed causal learning (Hinteract project). The PhD thesis will benefit from funding from BrainNets team and Amidex.

Profil et compétences recherchées

Nous recherchons un(e) candidat(e) fortement motivé(e), avec un intérêt marqué pour les bases neurales et computationnelles de la cognition. Le profil idéal combine une formation en **neurosciences cognitives** ou **systémiques** et en **neurosciences computationnelles** ou en **intelligence artificielle**. Une formation dans l'un de ces domaines accompagnée d'un intérêt démontré pour l'autre est également la bienvenue. Les compétences requises incluent une familiarité avec les méthodes expérimentales en neurosciences (p. ex., EEG, neuroimagerie ou électrophysiologie), une maîtrise de la programmation en Python, ainsi qu'une solide formation en statistiques et en analyse de données. Une expérience en modélisation computationnelle (apprentissage par renforcement, inférence bayésienne ou cadres d'inférence active) et/ou en méthodes d'analyse de théorie de l'information constituerait un atout majeur. De bonnes compétences en communication écrite et orale en anglais sont attendues.

Profile and skills required

We are looking for a highly motivated candidate with a strong interest in the neural and computational bases of cognition. The ideal profile combines training in both **cognitive** or **systems neuroscience** and **computational neuroscience** or **artificial intelligence**. A background in one of these fields with demonstrated interest in the other is equally welcome. Required skills include familiarity with experimental neuroscience methods (e.g., EEG, neuroimaging, or electrophysiology), programming proficiency (Python), and a solid grounding in statistics and data analysis. Experience with computational modelling (reinforcement learning, Bayesian inference, or active inference frameworks) and/or information-theoretic analysis methods would be a significant advantage. Good written and oral communication skills in English are expected.