

2EL1110 - Systèmes dynamiques en neurosciences

Responsables : **Antoine CHAILLET**

Département de rattachement : **DÉPARTEMENT AUTOMATIQUE**

Langues d'enseignement : **ANGLAIS**

Type de cours : **Electif 2A**

Campus où le cours est proposé : **CAMPUS DE PARIS - SACLAY**

Nombre d'heures d'études élèves (HEE) : **60**

Nombre d'heures présentielles d'enseignement (HPE) : **30**

Année académique : **2024-2025**

Catégorie d'électif : **Sciences de l'ingénieur**

Niveau avancé : **oui**

Présentation, objectifs généraux du cours :

Cet électif constitue une introduction aux outils permettant d'analyser les processus dynamiques impliqués dans le fonctionnement du cerveau. Malgré leur immense complexité, les fonctions cérébrales se basent en effet sur des processus dynamiques élémentaires dont certains peuvent être appréhendés par des outils mathématiques. La maîtrise de ces processus est indispensable pour avancer dans notre compréhension du fonctionnement du cerveau, pour optimiser les instruments de mesure de l'activité cérébrale (imagerie médicale, signaux électrophysiologiques, ...), pour développer des interfaces cerveau-machine, pour mettre au point des architectures de calcul neuro-inspirées, et pour comprendre les mécanismes impliqués dans certaines maladies neurologiques et ainsi progresser dans leur traitement.

Période(s) du cours (n° de séquence ou hors séquence) :

SG6

Prérequis :

- SG1 : Systèmes d'information et programmation
- SG1-ST2-SG3 : Convergence, Intégration, Probabilités, Equations aux dérivées partielles
- ST2 : Modélisation
- ST4 : Traitement du signal
- ST5 : Commande des systèmes dynamiques

Plan détaillé du cours (contenu) :

Chapitre 1 : Bases physiologiques et fonctions cérébrales (CM : 4.5h)

Ce premier chapitre présente les bases physiologiques de l'activité neuronale. Il décrit les principes élémentaires impliqués dans la génération d'un potentiel d'action et la communication entre neurones (soma, axone, dendrite, synapse, canaux ioniques, potentiel de repos), ainsi que la

plasticité cérébrale et les mécanismes de régulation homéostatique. Il décrit les principes physiques et biologiques qui sous-tendent ces comportements. Il aborde enfin les principales fonctions cérébrales (mémoire, systèmes moteurs, olfactifs et visuels) et leur altération en conditions pathologiques, notamment au travers de l'étude des oscillations cérébrales.

Chapitre 2 : Mesure et actionnement de l'activité cérébrale (CM : 3h)

Ce deuxième chapitre traite des différentes techniques de mesure de l'activité cérébrale, notamment les techniques électrophysiologiques (patch-clamp, enregistrement multi-unités, LFP, EEG, MEG) et l'imagerie (IRM, 2-photons). Il explique la nature des signaux mesurés et en compare les résolutions spatiales et temporelles. Il décrit également les différentes techniques utilisées pour influencer l'activité cérébrale, notamment au travers de la stimulation électrique et de l'optogénétique.

Chapitre 3 : Interfaces cerveau-machine (CM : 4.5h)

Ce sixième chapitre aborde le développement d'interfaces cerveau-machine, aussi appelées neuroprothèses. Ces dispositifs sont conçus pour restaurer l'autonomie de patients amputés ou tétraplégiques. Leur mise en place chez l'animal et l'humain nous renseigne en parallèle sur le fonctionnement et l'apprentissage dans les boucles sensorimotrices naturelles. Le chapitre détaille les différentes composantes de ces interfaces : enregistrement de l'activité neuronale invasive (ECoG, électrophysiologie corticale) ou non (EEG), traitement des signaux et algorithmes de commande motrice, retour sensoriel de la neuroprothèse vers le cerveau. Il évoque également la mise en jeu de mécanismes de plasticité cérébrale, notamment au niveau cortical, sur lesquels le développement d'interfaces peut s'appuyer pour optimiser l'apprentissage.

Chapitre 4 : Modèles mathématiques de neurones (CM : 3h)

Ce chapitre présente les modèles de neurones les plus utilisés. Il introduit les modèles à conductances au travers du célèbre modèle de Hodgkin-Huxley, et souligne son analogie électronique. Il aborde ensuite des modèles simplifiés tels que les modèles integrate & fire ou FitzHug-Nagumo, ainsi qu'une modélisation simple de la synapse et des mécanismes de plasticité neuronale. La simulation numérique de ces modèles est également abordée.

Chapitre 5 : Analyse des modèles neuronaux (CM : 4.5h, TP : 3h)

Ce chapitre présente des outils mathématiques utilisés dans l'analyse du comportement neuronal. Il présente pour cela la notion de diagramme de phase et de bifurcations. Ces notions sont d'abord présentées pour des modèles unidimensionnels, puis sur des modèles bidimensionnels. Le chapitre établit un lien entre ces bifurcations et le comportement qualitatif du neurone. Un TP sur Matlab-Simulink vise à implanter un modèle de neurones à conductance et à prédire son comportement par les outils théoriques présentés.

Chapitre 6 : Populations neuronales (CM : 1.5h, TP : 3h)

Ce cinquième chapitre s'intéresse à la dynamique d'un ensemble de neurones ou d'une structure cérébrale. Il présente des modèles simplifiés de l'activité d'une population neuronale tels que le modèle de Wilson-Cowan ou les champs neuronaux. Il montre comment prédire le comportement de tels modèles par une analyse de stabilité ou de bifurcations. Lors d'un TP sur Matlab-Simulink, les élèves étudieront le phénomène de rivalité binoculaire au travers d'un modèle simple de populations neuronales.

Conférence : Exemple de création de start-up (1.5h)

Une conférence du co-fondateur et responsable scientifique de la société Rythm conclut ce cours en présentant des innovations industrielles récentes (mesures non-invasives de l'activité cérébrale, reconnaissance de motifs dans les signaux électrophysiologiques) ainsi que les opportunités que représentent les neurosciences pour l'industrie et l'entrepreneuriat.

Déroulement, organisation du cours :

CM, TD, TP, travail hors présentiel.

Organisation de l'évaluation :

L'évaluation est faite sur la base d'un examen écrit sans documents (2h) en fin de cours et sur les rapports des deux TP. La pondération envisagée est : 60% sur l'examen écrite et 20% sur chaque TP. Toute absence non justifiée en TP conduira à un zéro à la note de TP. Les compétences seront évaluées au travers des rapports de TP et de l'examen écrit. Les compétences C1.2 et C1.3 seront approfondies lors des séances de TP.

Moyens :

Une équipe enseignante pluri-disciplinaire incluant des chercheurs en neurosciences computationnelles, un neurochirurgien, un enseignant-chercheur en Automatique et un créateur d'entreprise.

Les TP seront effectués sur des postes disposant de Matlab-Simulink.

Acquis d'apprentissage visés dans le cours :

A l'issue de ce cours, les élèves auront acquis les bases de neurosciences nécessaires à une interaction avec des professionnels du domaine (neurochirurgiens, experts en neurosciences computationnelles, expérimentateurs). Ils maîtriseront de plus des outils mathématiques permettant de modéliser l'activité d'un neurone ou d'une population neuronale, et de prédire leur comportement dynamique à la fois analytiquement et numériquement. Ils auront en outre été sensibilisés aux opportunités que constituent les neurosciences en termes de recherche, de développement médical ou industriel, et d'entrepreneuriat.

Description des compétences acquises à l'issue du cours :

By the end of this course, students will be able to:

- Understand neuroscience fundamentals, for possible interaction with professionals of the field (neurosurgeons, computational neuroscientists, experimenters)
- Model the activity of a neuron or a whole neuronal population
- Predict their behavior both analytically and numerically.

This course will thus be an opportunity to deepen skills:

- C1.2: "Use and develop adequate models, choose the right modeling scale and the right simplifying assumptions to treat a problem": Jalon 3
- C1.3: "Solve a problem by employing approximation, simulation and experiments": Jalon 2A
- C1.5: "Use a wide scientific and technical background in the context of a transdisciplinary

approach"

- C2.2: "Transpose to other fields, generalize knowledge"
- C2.3: "Quickly identify and acquire new knowledge and skills in relevant domains (technical, economical or other)".

Bibliographie :

- Dynamical Systems in Neuroscience: The Geometry of Excitability and Bursting, Eugene M. Izhikevich, The MIT Press, 2007
- Nonlinear dynamics and Chaos, by Steven Strogatz, Westview Press, 2001
- Mathematical Foundations of Neuroscience, by G. Bard Ermentrout & D. Terman, Springer, 2010
- Theoretical neuroscience, by P. Dayan & L.F. Abbott, The MIT Press, 2005