

Promotion IUF 2016
Rapport d'activité (2016-2021)

NOM : Chaillet

PRÉNOM : Antoine

DATE DE NAISSANCE : 09/07/1979

GRADE : PR1

DISCIPLINE PRINCIPALE : Automatique

CNU : 61

UNIVERSITÉ OU ÉTABLISSEMENT D'APPARTENANCE : CentraleSupélec

UNITÉ DE RECHERCHE D'APPARTENANCE : L2S – UMR 8506

CATÉGORIE : JUNIOR

THEMATIQUE DE RECHERCHE :
ANALYSE DES OSCILLATIONS CEREBRALES PARKINSONIENNES ET
DEVELOPPEMENT DE STIMULATION EN BOUCLE FERMEE

RESUME SCIENTIFIQUE A PROPOS DE LA REALISATION DU PROJET DE
RECHERCHE IUF (2 pages maximum) :

Avancées majeures / Etat d'achèvement / réorientations éventuelles au cours des 5 ans / Perspectives ouvertes par le travail réalisé

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement l'IUF pour cette délégation qui a grandement contribué à mon activité scientifique.

Durant ces cinq années de délégation, mes principaux développements ont visé à l'atténuation d'oscillations cérébrales pathologiques liées à la maladie de Parkinson, au moyen d'une stimulation cérébrale en boucle fermée. Ils se sont d'abord basés sur des modèles de populations neuronales moyennisées, c'est-à-dire représentant l'activité instantanée de la population dans son ensemble. Ces modèles sont non-linéaires et à retards, du fait des phénomènes de saturation naturels liés à des considérations physiologiques et de la communication non-instantanée entre les neurones. Sur ces modèles, nous avons proposé une stratégie de stimulation en boucle fermée permettant d'atténuer les oscillations pathologiques et ce, en prenant en compte les retards inhérents à l'acquisition et au traitement des signaux électrophysiologiques [RI.17]. Ces travaux ont été réalisés principalement avec E. Panteley et W. Pasillas-Lépine du L2S, avec le post-doctorant I. Haidar que nous co-encadrions, ainsi que les neurochirurgiens de l'hôpital H. Mondor de Créteil S. Palfi et S. Senova.

Afin de prendre en compte le caractère spatio-temporel des dynamiques impliquées, nous avons ensuite étendu ces résultats à des modèles appelés "neural fields". Ces

modèles sont de type intégro-différentiel et impliquent eux aussi des retards. Après avoir adapté la notion de stabilité entrée-état (ISS) à une telle classe de systèmes, nous avons montré qu'une simple commande proportionnelle permet d'atténuer de manière robuste les oscillations pathologiques [RI.14, BC.2]. L'efficacité de cette stimulation a été démontrée sous des conditions ne faisant intervenir que des grandeurs réellement estimables en pratique, dans la perspective de validations expérimentales futures. Nous avons enfin adapté la notion de stabilité incrémentale à ces systèmes spatio-temporels, de manière à étudier le phénomène d'entraînement d'une structure neuronale par une autre [CI.6]. Ces travaux ont été réalisés avec le post-doctorant G. Detorakis, ainsi que S. Palfi et S. Senova.

Plus récemment, nous avons travaillé sur des stratégies de stimulation adaptative. L'adaptation automatique du gain de stimulation permettrait en effet de s'affranchir de valeurs précises de paramètres du modèle, de compenser la variabilité inhérente à ces paramètres, et d'atténuer les oscillations cérébrales pathologiques en limitant les effets sur les bandes fréquentielles non-pathologiques. A cette fin, nous avons montré dans [RI.4, CI.3] qu'une technique adaptative basée sur la "sigma-modification" permet une atténuation arbitrairement forte de l'oscillation cérébrale ciblée en ne requérant la mesure et la stimulation que de la population neuronale excitatrice. Ces travaux ont été distingués par le prix du meilleur poster à la conférence internationale IFAC CPHS 2018 [CA.1]. A l'occasion de ces développements, nous avons par ailleurs découvert qu'un résultat classique pour l'analyse de la stabilité partielle s'avère erroné, comme nous l'avons démontré au travers d'un contre-exemple [RI.8]. Les tests de cette commande adaptative réalisés sur un modèle numérique de grande dimension, dans lequel chacun des neurones est simulé par un modèle à conductance, ont montré l'efficacité de cette approche sous les deux mécanismes de générations d'oscillations pathologiques : l'entraînement et le pacemaker [RI.7]. Ces travaux ont été réalisés avec J. Fleming et M. Lowery (UCD Irlande) dans le cadre de notre projet PHC Ulysses et avec J. Orłowski, dont j'ai co-encadré la thèse de doctorat avec M. Sigalotti (INRIA-LJLL) et A. Destexhe (CNRS-NeuroPSI).

D'une manière générale, je m'efforce de diffuser dans notre communauté l'opportunité que représentent les Neurosciences pour l'Automatique. Ceci se traduit par des publications telles que [RI.12] dans Annual Reviews in Control ou [NS.1] dans le magazine La Recherche, ainsi que de nombreux séminaires sur ce thème (dont une conférence plénière aux Journées Automatique du GdR MACS en 2016 [IV.2]). Cette volonté se traduit également au niveau de mes responsabilités d'enseignements. Je suis notamment l'un des co-fondateurs et co-directeurs du [M2 CNN](#) de l'Université Paris Saclay (Computational Neuroscience & Neuro-engineering), qui a ouvert en septembre 2020 (35 étudiants cette année). Au sein de CentraleSupélec, j'ai en outre créé le cours électif de 2ème année « Systèmes Dynamiques en Neurosciences » (50 élèves / an).

Sur la période concernée, cette recherche a fait l'objet de plusieurs financements (en plus des fonds IUF). Je suis notamment co-porteur, avec L. Estebanez (NeuroPSI) du projet 80|PRIME DYNACO "Dynamical control of a sensory-motor brain-machine interface" dans le cadre de la mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires du CNRS et qui finance la thèse de doctorat de Z. Hayatou et l'achat de matériel expérimental. D'autre part, je suis impliqué dans le projet DIRECTremor financé par l'industriel Boston Scientific (631k€) visant à l'évaluation sur 20 patients de stratégies innovantes de stimulation cérébrale profonde ; ce projet est coordonné par S. Senova et S. Palfi et devrait permettre une validation expérimentale des travaux théoriques développés lors de cette délégation. Je

participe également à l'ANR MindMadeClear (2017-2021, 300k€), pilotée par H. Mounier (L2S), qui vise à modéliser les processus cérébraux impliqués dans la méditation. Depuis 2014, je suis en outre directeur adjoint de l'institut iCODE (budget total : 2 100k€, 140 chercheurs, 13 institutions), qui vise à développer et promouvoir la recherche en Automatique au sein de l'Université Paris Saclay, et qui vient d'être pérennisé en tant qu'Objet Interdisciplinaire de Paris Saclay (H-CoDe).

Depuis octobre 2019, je suis éditeur associé pour l'IEEE Transactions on Automatic Control, l'une des deux revues principales de mon domaine. En 2019, j'ai également été membre du comité d'organisation de l'IEEE Conf. on Decision and Control, la conférence annuelle principale de mon domaine, pour laquelle j'étais Student Activities Chair. J'ai organisé plusieurs événements scientifiques, tels que le "Meet the faculty candidates" à CDC 2019 (environ 100 participants) ou la journée scientifique "Health & Biomedical" de mon laboratoire en 2019 (20 participants). Depuis 2018, je co-anime l'axe transverse "Santé et biomédical" (une vingtaine de chercheurs) au sein de mon laboratoire L2S afin d'intensifier les collaborations interdisciplinaires sur ces thématiques. Je suis également expert évaluateur pour plusieurs institutions, telles que l'ANR, l'ERC, diverses commissions nationales étrangères (Italie, Roumanie, Kazakhstan) et la société privée d'investissement scientifique Truffle Capital.

Nos travaux sur le contrôle d'oscillations cérébrales pathologiques ont ouvert de nombreuses questions scientifiques qu'il reste à aborder. D'un point de vue théorique, des questions relatives à la commandabilité et à l'observabilité des neural fields, en présence ou non de retard, restent ouvertes du fait du caractère intégratif-différentiel de ces modèles. Nous commençons à aborder ces questions au travers du post-doctorat de L. Brivadis, que je co-encadre avec J. Auriol (L2S). D'autre part, le contrôle d'oscillations cérébrales par stimulation en boucle fermée s'avère prometteur au delà de la maladie de Parkinson. J'ai donc soumis en 2017 et en 2018 un projet ERC Consolidator, qui a été évalué A lors de la première évaluation mais n'a finalement pas été retenu. L'une de ces applications concerne les circuits mémoire, notamment pour la maladie d'Alzheimer. Nous avons proposé avec S. Senova (APHP) et A. Lozano (Toronto hospital) des stratégies de stimulation innovantes [RI.10], que nous sommes en train d'implémenter dans le cadre de la thèse de M. Faillot que je co-encadre avec S. Palfi et S. Senova à l'hôpital H. Mondor de Créteil [RI.5]. De nouvelles questions liant Automatique et Neurosciences sont également apparues pendant cette délégation IUF, notamment une mesure objective de la douleur par mesure non-invasive de l'activité électrique des petites fibres (collaboration avec J.P. Lefaucheur, S. Senova et E. Avignon) ainsi que le rôle et la compréhension des phénomènes de criticité auto-organisée dans le fonctionnement du cerveau (collaboration avec L. Greco). Ces thématiques constituent d'autres perspectives intéressantes pour ma recherche dans les années qui viennent.

Articles dans des revues internationales avec comité de lecture

- [RI.1] G. Göksu and **A. Chaillet**, Integral input-to-state stable time-delay systems in cascade. *To appear in Automatica*, 2022.
- [RI.2] I. Karafyllis and **A. Chaillet**, Lyapunov conditions for uniform asymptotic output stability and a relaxation of Barbălat's lemma. *To appear in Automatica*, 2022.
- [RI.3] **A. Chaillet**, G. Göksu and P. Pepe, Lyapunov-Krasovskii characterizations of integral input-to-state stability of delay systems with non-strict dissipation rates. To appear in *IEEE Trans. Autom. Contr.*, 2022.
- [RI.4] J. Orłowski, **A. Chaillet**, A. Destexhe, M. Sigalotti. Adaptive control of Lipschitz time-delay systems by sigma modification with application to neuronal population dynamics. To appear in *Systems and Control Letters*, 2022.
- [RI.5] M. Faillot, **A. Chaillet**, S. Palfi and S. Senova, Rodent models used in preclinical studies of deep brain stimulation to rescue memory deficits. *Neurosci. Biobehav. Rev.*, Nov. 2021.
- [RI.6] G. Detorakis, **A. Chaillet** and N. Rougier, Stability analysis of a neural field self-organizing map. *Journal of Mathematical Neuroscience*, 10(1), p.1-20, 2020.
- [RI.7] J. Fleming, J. Orłowski, M. Lowery and **A. Chaillet**, Self-tuning deep brain stimulation controller for suppression of beta oscillations : analytical derivation and numerical validation. *Frontiers in Neuroscience*, 14, p.639, Jun. 2020.
- [RI.8] J. Orłowski, **A. Chaillet** and M. Sigalotti, Counterexample to a Lyapunov condition for uniform asymptotic partial stability. *IEEE Control Systems Letters*, 4(2):397-401, Apr. 2020.
- [RI.9] S. Naderi Lordejani, B. Besselink, **A. Chaillet**, N. van de Wouw, Model order reduction for linear time delay systems : a delay-dependent approach based on energy functionals. *Automatica*, 108701 :1-10, Feb. 2020.
- [RI.10] S. Senova, **A. Chaillet** and A. Lozano, Forniceal closed-loop Deep Brain Stimulation for Alzheimer's Disease. Opinion paper in *Trends in Neuroscience*, 41(7):418-428, 2018.
- [RI.11] J. Laporte, **A. Chaillet** and Y. Chitour, Global stabilization of linear systems with bounds on the feedback and its successive derivatives. *SIAM J. Control Optim.*, 55(5), pp. 2783–2810, 2017.
- [RI.12] **A. Chaillet** and Y. Frégnac, Dynamics in Neuroscience. Chapter in *Systems & Control for the Future of Humanity. Research agenda: current and future roles, impact and grand challenges*, Annual Reviews in Control, 43, pp. 38-40, 2017.
- [RI.13] S. Senova, I. Sisniak, C.C. Chiang, I. Doignon, S. Palfi, **A. Chaillet**, C. Martin, F. Pain, Experimental assessment of the safety and potential efficacy of high irradiance photostimulation of brain tissues. *Nature Scientific Reports*, 7:43997, 2017.
- [RI.14] **A. Chaillet**, G. Is. Detorakis, S. Palfi and S. Senova, Robust stabilization of delayed neural fields with partial measurement and actuation. *Automatica*, 83, pp. 262 - 274, 2017.
- [RI.15] J. Laporte, **A. Chaillet** and Y. Chitour, Global stabilization of classes of linear control systems with bounds on the feedback and its successive derivatives. *Systems & Control Letters*, 99, pp. 17-24, 2017.

[RI.16] R. Azouit, **A. Chaillet**, Y. Chitour, and L. Greco, Strong iISS for a class of systems under saturated feedback. *Automatica*, 71, pp. 272-280, 2016.

[RI.17] I. Haidar, W. Pasillas-Lépine, **A. Chaillet**, E. Panteley, S. Palfi and S. Senova, A firing-rate regulation strategy for closed-loop deep brain stimulation. *Biological Cybernetics*, 110(1), pp. 55-71, 2016.

Chapitres d'ouvrage

[BC.1] S. Naderi Lordejani, B. Besselink, **A. Chaillet** and N. van de Wouw, On extended model order reduction for linear time delay systems. Book chapter in *MODRED*, to appear, 2021.

[BC.2] **A. Chaillet**, G. Detorakis, S. Palfi, and S. Senova, ISS-stabilization of delayed neural fields by small-gain arguments. Book chapter in *Delays and Interconnections: Methodology, Algorithms and Applications*, 2019.

Conférences invitées

[IV.1] **A. Chaillet**. Point-wise dissipation in time-delay systems: recent results and open questions, Online Seminar "Input-to-State Stability and its Applications", <https://youtu.be/yd08gO8rxhA>, Oct. 2021

[IV.2] **A. Chaillet**. Feedback attenuation of pathological brain oscillations in a spatiotemporal model. In *Journées Automatique du GdR MACS (JAMACS'16)*, Lille, France, Nov. 2016.

Conférences internationales avec comité de lecture

[CI.1] G. Göksu and **A. Chaillet**, Analysis of Integral Input-to-State Stable time-delay systems in cascade. *IFAC World Congress*, 2020.

[CI.2] **A. Chaillet**, J. Orłowski, P. Pepe, A relaxed Lyapunov-Krasovskii condition for global exponential stability of Lipschitz time-delay systems. *IEEE Conf. Dec. and Control*, Nice, France, 2019.

[CI.3] J. Orłowski, **A. Chaillet**, M. Sigalotti, and A. Destexhe, Adaptive scheme for pathological oscillations disruption in a delayed neuronal population model. *IEEE Conf. on Decision and Control*, Miami, USA, 2018.

[CI.4] **A. Chaillet** and P. Pepe, Integral input-to-state stability of delay systems based on Lyapunov-Krasovskii functionals with point-wise dissipation rate. *IEEE Conf. on Decision and Control*, Miami, USA, 2018.

[CI.5] B. Besselink, **A. Chaillet**, and N. van de Wouw, Model reduction for linear delay systems using a delay-independent balanced truncation approach. *IEEE Conf. on Decision and Control*, Melbourne, Australia, 2017.

[CI.6] **A. Chaillet** and G. Is. Detorakis, Incremental stability of spatiotemporal delayed dynamics and application to neural fields. *IEEE Conf. on Decision and Control*, Melbourne, Australia, 2017.

[CI.7] **A. Chaillet**, P. Pepe, P. Mason, and Y. Chitour, Is a point-wise dissipation rate enough to show ISS for time-delay systems ? *IFAC World Congress*, Toulouse, France, 2017.

Conférences internationales sans actes

[CA.1] J. Orłowski, **A. Chaillet**, M. Sigalotti, and A. Destexhe. Adaptive stimulation strategy for selective brain oscillations disruption in a neuronal population model with

delays. *2nd Conf. on Cyberphysical and Human Systems (CPHS)*, Best poster award, Miami, USA, Dec. 2018.

[CA.2] J. Orłowski, **A. Chaillet**, M. Sigalotti, J. Fleming, and A. Destexhe. Selective oscillation disruption in a delayed neural field model of STN-GPe loop. *Bernstein conference*, Berlin, Germany, 2018.

[CA.3] D. Da Silva and **A. Chaillet**. Entrainability and frequency-response of interconnected delayed rate models by Krasovskii and Razumikhin approaches. *Int. Conf. on Mathematical Neuroscience*, Antibes - Juan les Pins, Jun. 2016.

[CA.4] **A. Chaillet** and G. Is. Detorakis. Robust stabilization of delayed neural fields by proportional feedback using input-to-state stability and small-gain theorem. *Int. Conf. on Mathematical Neuroscience*, Antibes - Juan les Pins, Jun. 2016.

Workshops

[W.1] **A. Chaillet**, P. Pepe, Y. Chitour, P. Mason. On the ISS property of time-delay systems through point-wise dissipation rate. *Workshop on Stability and Control of Infinite-Dimensional Systems (SCINDIS 2018)*, Passau, Germany, Oct. 2018.

[W.2] **A. Chaillet**, G. Is. Detorakis, S. Palfi, S. Senova. Stability and robustness analysis of spatiotemporal delayed dynamics with application to feedback attenuation of pathological brain oscillations. *Workshop on Verification of Biological Systems*, ENS Cachan, France, May 2016.

Articles de vulgarisation

[NS.1] **A. Chaillet** and R. Postoyan. L'automatique au service des neurosciences. *La Recherche*, p. 62-66, Dec. 2018.

ENCADREMENT DOCTORAL (Direction de thèses) :

Depuis 2020 : Co-directeur de thèse (50%) de D. Wu, avec G. Duan (50%), Contraction analysis of nonlinear systems on manifolds.

Depuis 2020 : Co-directeur de thèse (25%) de Z. Hayatou, avec L. Estebanez (50%) et V. Ego-Stengel (25%), Appropriation of a mouse prosthesis controlled by a brain-machine interface.

Depuis 2018 : Co-encadrant (25%) de M. Faillot, avec S. Senova (50%) et S. Palfi (25%), Closed-loop stimulation strategies for mnemonic circuits.

2016-2019 : Co-directeur de thèse (50%) de J. Orłowski, avec M. Sigalotti (25%) et A. Destexhe (25%), Adaptive control of time-delay systems to counteract pathological brain oscillations.

AUTRES AVANCÉES SIGNIFICATIVES AU COURS DE LA PÉRIODE :

En plus de mes activités autour des neurosciences, j'ai poursuivi mes recherches sur l'analyse de la stabilité et de la robustesse de systèmes non-linéaires interconnectés. D'une manière générale, les outils théoriques que j'ai développés s'appuient sur le formalisme de la stabilité entrée-état (ISS) introduite par E.D. Sontag à la fin des années 1980 et devenue depuis un outil standard pour l'analyse et la commande des systèmes non-linéaires. J'ai notamment entrepris la rédaction d'un ouvrage sur cette

thématique, en collaboration notamment avec E.D. Sontag. Ce document (d'environ 400 pages actuellement) devrait être publié chez Springer l'an prochain.

Motivé par mes travaux en neuroscience, j'ai également abordé une thématique nouvelle pour moi : l'analyse des systèmes non-linéaires à retards. Pour ces systèmes, une caractérisation de type Lyapunov pour l'ISS existe depuis les travaux de I. Karafyllis et P. Pepe notamment. Cependant, cette caractérisation requiert un taux de dissipation impliquant la fonctionnelle de Lyapunov elle-même, ce qui complique parfois son application à des systèmes physiques. Dans [CI.7], nous avons conjecturé que l'ISS serait également garantie dans le cas d'un taux de dissipation n'impliquant que la valeur présente de l'état, ce qui simplifierait grandement l'analyse et uniformiserait la théorie de l'ISS avec celle de la stabilité des systèmes sans entrée. Cette conjecture est encore ouverte et a fait l'objet de nombreuses discussions avec des chercheurs internationaux, notamment lors du workshop SCINDIS 2018 pour lequel j'étais conférencier invité [W.1]. Nous avons toutefois identifié des classes de systèmes pour lesquelles la conjecture est vraie [CI.7]. Nous avons en outre démontré cette conjecture pour l'iISS [RI.3, CI.4] et pour la stabilité globale exponentielle de systèmes suffisamment réguliers [CI.2]. Ces résultats nous ont permis de proposer des outils pour l'analyse de la stabilité de systèmes à retards en cascade [RI.1]. Ces travaux ont été réalisés principalement avec P. Pepe (L'Aquila, Italie) ainsi que des membres du L2S, P. Mason et Y. Chitour, et J. Orłowski, doctorant que j'ai co-encadré. J'ai enfin travaillé sur la réduction de modèles à retards en collaboration avec S. Naderi Lordejani et N. Van der Wouw (TU Eindhoven) et B. Besselink (Univ. Groningen) qui a donné lieu aux travaux [RI.9, BC.1, CI.5].

PRIX ET DISTINCTIONS SCIENTIFIQUES OBTENUS AU COURS DE LA PÉRIODE (indiquer les dates) :

2021 : Obtention de la PEDR

2020 : Promotion au grade de professeur des universités 1^{ère} classe

2019 et 2020 : Prime pédagogique, récompensant mon investissement pédagogique au sein de CentraleSupélec

2019 : Best poster award, 2nd IFAC Conf. on cyberphysical and human systems, Miami, USA. Co-récipiendaire avec J. Orłowski, M. Sigalotti et A. Destexhe pour le poster [CA.1].

AUTRES OBSERVATIONS :

L'IUF est une bénédiction : longue vie à lui ! J'exprime ma plus sincère reconnaissance à l'IUF de m'avoir octroyé cette délégation qui a eu un impact extrêmement positif sur ma recherche.

Je tiens à préciser que mes collègues de CentraleSupélec sous contrat LRU (non-fonctionnaires) ne sont pas éligibles à l'IUF. Je trouve cela aussi regrettable qu'incompréhensible.

Acceptez-vous la mise en ligne de ce document sur le site internet de l'IUF : Oui