



SUJET DE THÈSE 2021

Intelligence Artificielle et contrôle des plasmas de fusion : Application au tokamak WEST

Artificial intelligence and fusion plasma control: Application to the WEST tokamak

Nom du responsable (ou codirecteur) de thèse : Rémy Nouaillietas	e-mail :	Remy.nouaileltas@cea.fr
	page web :	http://irfm.cea.fr/
	téléphone :	+33 (0)4 42 25 48 25
	secrétariat :	+33 (0)4 42 25 62 25
Équipe de Recherche : IRFM/STEP/GPAM		

Nom du Directeur de thèse : Laurent Lefèvre	e-mail :	laurent.lefevre@lcis.grenoble-inp.fr
	page web :	http://lcis.grenoble-inp.fr/
	téléphone :	+33 (0)4 75 75 94 09
	secrétariat :	+33 (0)4 75 75 94 49
Équipe de Recherche : LCIS/MACSY-COSY		

Résumé du sujet en Français :

La fusion contrôlée est une solution prometteuse pour créer sur le long terme une civilisation libérée du carbone. Pour atteindre ce but avant la fin du siècle, le projet ITER (www.iter.org), démarré à Cadarache en 2005, doit démontrer la faisabilité technique de réactions de fusion contrôlées au sein d'une machine appelée tokamak. Une des problématiques à traiter pour cela est le contrôle performant et robuste du plasma, milieu où se réalisent les réactions de fusion. Les non-linéarités, les incertitudes ainsi que la faible observabilité du plasma limitent aujourd'hui l'exploration du domaine expérimental possible à des suites d'ajustements paramétriques expérience après expérience, sur une base à la fois empirique et fondée sur notre compréhension de la physique des plasmas de fusion. Cette thèse propose d'améliorer ce point grâce à l'utilisation en temps réel du code de reconstruction RAPTOR [1] et le développement de nouveaux contrôles du plasma à base d'intelligence artificielle. Les travaux répondront aux problématiques pratiques du dispositif expérimental WEST (Tungsten (W) Environment in Steady-state Tokamak, <http://irfm.cea.fr/en/west/>), en charge d'étudier l'opération de tokamaks métalliques sur des temps longs. Le candidat, après une recherche bibliographique sur le sujet, s'intéressera en particulier à au contrôle des impuretés lourdes entrant dans le plasma. L'objectif est d'amener les développements jusqu'à la mise en oeuvre des algorithmes de contrôle sur WEST. Les travaux se feront en collaboration avec le LCIS (Laboratoire de Conception et d'Intégration des Systèmes, spécialiste de la commande des systèmes complexes) et le SPC (Swiss Plasma Center).

Résumé du sujet en Anglais :

Fusion energy is one of the most promising solutions for creating a carbon free civilization. To achieve this goal before the end of this century, the ITER project (www.iter.org), started at Cadarache in 2005, should demonstrate in the next decades the technical feasibility of controlled fusion reactions in a facility called a tokamak. One of the critical issues to reach this purpose is the efficient and robust control of the plasma

(environment where the fusion reactions occur). The non-linearity, the uncertainties, and the weak observability of the plasma are currently what most limit exploration of the experimental domain via tuning of the control parameters using the time-consuming trial-and-error approach. We propose to improve upon this by the use of the RAPTOR code [1] and the development of new plasma control algorithms based on artificial intelligence. The development will answer to the practical issues of WEST (Tungsten (W) Environment in Steady-state Tokamak, <http://irfm.cea.fr/en/west/>), an experimental facility primarily responsible for studying the operation of long-duration plasmas on metallic tokamaks. The applicant, after a bibliographical review on the subject, will investigate the control of the heavy impurities entering into the plasma. The aim is to advance the development of the control algorithms to the point that practical integration and tests on the WEST facility are successful. Collaboration is foreseen with the LCIS (Laboratory of System Conception and Integration - specialized in the control of complex systems) and with SPC (Swiss Plasma Center).

Formation recherchée / recommandée : Master en automatique, intelligence artificielle et/ou master en fusion.

La fusion au sein d'un plasma confiné magnétiquement, malgré une application déjà identifiée, est encore du domaine de la recherche fondamentale : En plus de la nécessaire progression de notre savoir théorique, l'opération des différentes machines actuelles reste délicate et passe par un long apprentissage en partie empirique.

Cette approche est peu satisfaisante en vue de la mise en route et de l'exploitation d'ITER (www.iter.org) et surtout n'est pas compatible avec la fiabilité d'un futur réacteur. Pour une opération plus déterministe d'un dispositif expérimental de fusion, une meilleure maîtrise du plasma est nécessaire. Celle-ci peut être améliorée de plusieurs façons : la première est de mieux observer le plasma afin de pouvoir anticiper toutes déviations non voulues, la deuxième est d'améliorer intrinsèquement les algorithmes de commande en leur intégrant davantage de connaissances.

Pour le premier axe d'amélioration, ce sujet propose de travailler sur l'intégration du code de reconstruction RAPTOR [1] dans le système de contrôle temps réel de WEST. Ce code permet de reconstruire de façon cohérente les profils internes du plasma. Pour cela il intègre différentes équations simplifiées décrivant l'évolution temporelle du plasma dans les domaines électromagnétiques, matériels et énergétiques. Ces équations sont ensuite ajustées en temps réel grâce aux données fournies par les diagnostics. Elles permettent en outre de prédire à un horizon raisonnable l'évolution du plasma et donc d'agir dessus. Ce travail se fera en collaboration avec Federico Felici (Swiss Plasma Center), développeur du code RAPTOR, avec qui nous avons déjà eu l'occasion de travailler [2].

Le deuxième axe d'amélioration, portant sur l'utilisation de plus de connaissances dans les algorithmes de commandes, permettra de mettre en œuvre les derniers avancés autour de l'intelligence artificielle. L'idée est ici d'utiliser des réseaux de neurones entraînés en fonction du problème traité soit sur une base de données expérimentales, soit à l'aide d'un code de simulation (type RAPTOR). On peut noter l'existence d'applications de réseaux de neurones (deep learning) dans le domaine de la fusion, en particulier pour la prédiction de disruptions (perte soudaine du confinement du plasma) [3], la reconstruction temps-réel de l'équilibre plasma [4] ou sa reconstruction tomographique [5]. Dans ce sujet, une nouvelle application est visée : le contrôle de la présence d'ions autre que deutérium dans le plasma.

Ces « impuretés », issues de la paroi de la chambre à vide où se développe le plasma, rentrent dans le plasma entre autre lors de la phase de formation de celui-ci. En rayonnant et refroidissant localement le plasma, elles peuvent générer des instabilités Magnéto-Hydro-Dynamique compromettant la suite du scénario. En fonction de l'état de la paroi, la présence de ces impuretés évolue au cours de la session et être plus ou moins problématiques. Ainsi un ajustement systématique et empirique des stratégies de mitigation de ces impuretés est nécessaire afin de retrouver à chaque fois un plasma propre. Cette

méthode nécessite plusieurs essais et entraîne une perte de temps expérimental (10 minutes minimum entre chaque essai). Sur WEST, grâce à sa base de données expérimentales, il pourrait être possible d'utiliser un algorithme de deep learning pour prédire la quantité d'impuretés mobilisables. Cette approche se baserait ainsi sur le suivi de l'état de la paroi (plasma après plasma) et sur un calcul à priori de la bonne stratégie pour expulser les impuretés. Elle pourrait être complétée par une commande par rétroaction grâce aux profils calculés par RAPTOR ou un réseau de neurones alimenté par des données temps réel.

Le programme de cette thèse est volontairement ambitieux, il a pour but de répondre à des besoins pratiques et réels de l'opération d'un tokamak. L'objectif est que la pertinence des différents algorithmes de commande développés lors de cette thèse les rendent utiles à l'opération de WEST et - à terme - puissent nous permettre d'améliorer notre compréhension globale des phénomènes physiques mis en jeux.

La thèse se déroulera majoritairement à l'IRFM au sein du service d'exploitation de WEST (STEP) et du groupe pilotage (GPAM). Cette immersion devrait permettre au doctorant de comprendre rapidement les enjeux liés à l'opération et au contrôle d'un tokamak : au bout de 3 ans, il pourra rendre compte d'un savoir-faire pratique sur un grand dispositif expérimental, compétence qui pourra fortement valoriser pour la suite de sa carrière.

Les missions auprès de nos collaborateurs (SPC et LCIS) seront organisées en fonction des besoins et permettront à l'étudiant de garder un pied dans le monde universitaire (via le LCIS) et de pouvoir justifier d'une expérience internationale avec le SPC. Le SPC disposant lui aussi d'un tokamak (TCV), il est tout à fait envisageable que les méthodes et algorithmes développés dans le cadre de cette thèse puissent aussi être adaptés sur celui-ci.

Le LCIS et l'IRFM ont pu créer depuis 10 ans une forte collaboration traduite par la participation à l'ANR TORID [6] et plusieurs co-encadrements (3 stages de Master, une thèse et un post-doc) [2], [7-9]. Fort de ces réussites passées et d'une méthode d'encadrement éprouvée, cette thèse multidisciplinaire se fera en partenariat entre les 2 entités pour le bénéfice du candidat : En plus de l'expertise en physique des plasmas, la thèse devrait permettre à celui-ci de devenir un expert en intelligence artificielle. Ces dernières compétences sont extrêmement recherchées aujourd'hui et seront donc facilement valorisables.

[1] Real-time-capable prediction of temperature and density profiles in a tokamak using RAPTOR and a first-principle-based transport model, F. Felici and al. Nuclear Fusion, July 2018.

[2] Plasma q-profile control in tokamaks using a damping assignment passivity-based approach, N.M.T. Vu and al. Control Engineering Practice, 2016

[3] A cross-tokamak neural network disruption predictor for the JET and ASDEX Upgrade tokamaks, C.G. Windsor and al. Nuclear Fusion, April 2005

[4] Real-Time Control of a Tokamak Plasma Using Neural Networks, Chris M Bishop and al. Neural Computation, Jan. 1995

[5] Applications of Deep Learning to Nuclear Fusion Research, D. R. Ferreira, Plasma Physics, Nov. 2018

[6] <http://laris.univ-angers.fr/fr/activites-scientifiques/projets/projets-anterieurs/torid.html>

[7] Symplectic spatial integration schemes for systems of balance equations, N.M.T. Vu and al. Journal of Process Control, 2017

[8] WEST magnetic Control, R. Nouailletas and al. Accepted in Conference on Decision and Control, 2019

[9] Structure Preserving Discretization of PDEs for Control and Applications, B. Vincent and al. Accepted in Conference on Decision and Control, 2019

Collaborations scientifiques et/ou partenariats industriels envisagés :

- Nom du collaborateur: Laurent Lefèvre

- Organisme/Société: LCIS

- Raison de la collaboration:

Le Professeur Laurent Lefèvre sera le directeur de cette thèse. Il est un spécialiste reconnu des systèmes à paramètres distribués, c'est-à-dire des systèmes dont les états varient à la fois en fonction du temps et de l'espace. Il a en particulier encadré deux thèses sur la modélisation, la simulation et la commande des plasmas de fusion. Ainsi il fait partie des rares personnes à la fois compétents sur les problématiques de fusion et sur les problématiques plus génériques de commande des systèmes distribués. Sa participation à cette thèse apportera la prise de recul nécessaire à tout travail de recherche et permettra de valoriser celui-ci au sein de la communauté académique (automatique, mathématiques appliquées).

Collaborations scientifiques et/ou partenariats industriels envisagés :

- Nom du collaborateur: Federico Felici

- Organisme/Société: SPC-EPFL, Lausanne

- Raison de la collaboration:

Federico Felici est un spécialiste du contrôle des plasmas de fusion. Son expertise reconnue internationalement lui a permis de faire du code RAPTOR (RAPid Plasma Transport Simulator) dont il est le créateur, un code de référence à travers la communauté fusion. RAPTOR est un code de transport 1D du plasma spécialement développé pour une utilisation temps réel et/ou l'optimisation/design de scénario. Il est utilisé de façon routinière sur TCV en Suisse mais aussi sur AUG (ASDEX-Upgrade), le tokamak allemand. L'utilisation de ce code dans le cadre de cette thèse permettra à la fois de valider en simulation les différents développements. L'intégration de la version temps réel de RAPTOR dans le système de contrôle de WEST ouvrira de larges perspectives qui dépasseront les travaux présentés ici.