



## SUJET DE THÈSE 2021

### Simuler la turbulence de bord pour ITER : Améliorer la résolution numérique d'un problème de diffusion très anisotrope mal conditionné (Simulating edge plasma turbulence for ITER: Improving the numerical resolution of a very anisotropic, poorly conditioned diffusion problem)

<b>Nom du responsable (ou codirecteur) de thèse :</b>	<b>e-mail :</b> <a href="mailto:Hugo.bufferand@cea.fr">Hugo.bufferand@cea.fr</a>
	<b>page web :</b>
	<b>téléphone :</b> +33 (0)4 42 25 77 04
	<b>secrétariat :</b> +33 (0)4 42 25
<b>Équipe de Recherche :</b>	

<b>Nom du Directeur de thèse :</b>	<b>e-mail :</b> <a href="mailto:Eric.serre@univ-amu.fr">Eric.serre@univ-amu.fr</a>
	<b>page web :</b>
	<b>téléphone :</b> +33 (0)4 42 25
	<b>secrétariat :</b> +33 (0)4 42 25
<b>Équipe de Recherche :</b>	

#### Résumé du sujet en Français :

*Pour prédire le dépôt de chaleur sur les composants face au plasma des tokamaks actuels et des réacteurs du futur, un effort important est mené pour développer les codes capables de modéliser la turbulence dans le plasma de bord. De nombreux problèmes mathématiques et numériques restent à surmonter pour pouvoir simuler le plasma dans une machine de la taille d'ITER. En particulier, calculer le potentiel électrique requiert l'inversion d'un Laplacien anisotrope 3D. L'anisotropie est très forte avec une diffusion dans la direction parallèle au champ magnétique plusieurs millions de fois supérieure à la diffusion dans les directions transverses. Par ailleurs, les conditions limites de type Robin presque dégénérées en conditions de Neumann ( $\text{grad}(\Phi) + \epsilon \Phi = A$  avec  $\epsilon$  un petit paramètre) rendent le problème difficilement inversible car très mal conditionné. Différents solveurs linéaires sont utilisés pour résoudre le problème : des solveurs directs qui marchent bien mais qui ne permettent pas de monter en résolution, le coup de calcul étant vite prohibitif et la parallélisation peu efficace ; des solveurs itératifs dont les plus prometteurs actuellement utilisent un pré-conditionneur de type algébrique-multigrille. Le sujet du stage consistera à rechercher des solutions pour accélérer la résolution du Laplacien en suivant principalement deux pistes : construire un pré-conditionneur adapté en reformulant éventuellement le problème (jeu sur la géométrie, agrégation « physique » des inconnues du problème) ; tester les bibliothèques « sur étagères » pour résoudre le problème en recherchant une bonne parallélisation du calcul (ex : implémentation de solveur algébrique multigrille sur GPU [AMGX Nvidia]). Le sujet de stage pourra se poursuivre en thèse.*

#### Résumé du sujet en Anglais :

*To predict heat deposition on plasma-facing components of current tokamaks and future reactors, a major effort is being made to develop codes capable of modeling turbulence in the edge plasma. Many mathematical and numerical problems remain to be overcome in order to be able to simulate plasma in a machine the size of ITER. In particular, calculating the electric potential requires the inversion of a 3D anisotropic Laplacian. The anisotropy is very strong with diffusivity in the direction parallel to the magnetic field several million times greater than diffusivity in the transverse directions. In addition, the boundary condition of Robin type almost degenerated in Neumann conditions ( $\text{grad}(\Phi) + \epsilon \Phi = A$  with  $\epsilon$  a small parameter) makes the problem difficult to invert because very poorly conditioned. Various linear solvers are used to solve the problem: direct solvers which work well but which do not make it possible to go up in resolution, the computation time being quickly prohibitive and the parallelization inefficient; iterative solvers, the most promising of which currently use an algebraic-multigrid type pre-conditioner. The subject of the internship will consist in seeking solutions to accelerate the resolution of the Laplacian by mainly following two tracks: building an adapted pre-conditioner by possibly reformulating the problem (play on the geometry, "physical" aggregation of the unknowns of the problem); test the libraries "on the shelf" to solve the problem by looking for a good parallelization of the computation (ex: implementation of multigrid algebraic solver on GPU [AMGX Nvidia]). The internship subject may continue into a thesis.*

**Formation recherchée / recommandée : M2 ou Diplôme d'ingénieur avec une spécialité Mathématiques appliquées**

**Intitulé du master préconisé :**

**Description détaillée du sujet :**

*Le code SOLEDGE3X a été récemment développé à l'IRFM pour modéliser la turbulence dans le plasma de bord des tokamaks. Pouvoir modéliser la turbulence de bord à l'échelle d'un tokamak comme ITER revêt un intérêt majeur pour prédire le dépôt de puissance sur les composants face au plasma du réacteur. Cette modélisation multi-physique incluant le plasma, les neutres, les impuretés (injectées dans le plasma pour rayonner ou générées par érosion de la paroi...) est complexe et présente de très nombreux degrés de libertés (maillage 3D comportant plusieurs milliards de points de grille, modélisation fluide multi-espèces). Deux mécanismes clés contrôlent le dépôt de puissance sur les composants face au plasma d'un tokamak : premièrement, le transport radial (du cœur chaud vers le bord froid) majoritairement turbulent et qui va régler la largeur de la couche limite de plasma au travers de laquelle la puissance plasma va se déposer ; deuxièmement, les mécanismes de dissipation de la puissance en volume que ce soit par interaction avec les neutres (espèce non confinée qui pourra déposer la puissance sur la paroi de façon diffuse) ou que ce soit par rayonnement. Ces deux phénomènes ne sont pas complètement indépendants car les mécanismes dissipant l'énergie en volume, en jouant sur les propriétés du plasma, peuvent modifier le régime turbulent et impacter le transport. Une modélisation globale multi-physique est donc requise. Par ailleurs, l'apparition d'une barrière de transport associée à une baisse du transport turbulent au bord du plasma, bien caractérisée expérimentalement, échappe toujours à une modélisation « premiers principes ». Les performances d'ITER reposent en partie sur cette barrière de transport et il est donc crucial de pouvoir comprendre son établissement. Ce défi est également au cœur du développement du code SOLEDGE3X.*

*SOLEDGE3X repose sur une modélisation fluide du plasma. En complément des approches cinétiques, cette approche fluide permet de réduire le nombre de degrés de libertés (bien que celui-ci reste conséquent pour ITER) et est en partie justifiée par l'augmentation de la collisionnalité dans le plasma de bord. Le code résout le bilan de matière, quantité de mouvement et énergie pour un nombre arbitraire d'espèces, permettant ainsi de traiter des plasmas Deuterium+Tritium en incluant aussi des impuretés (Azote, Beryllium, Tungstène...). Le solveur plasma est couplé au code EIRENE (cinétique Monte-Carlo) qui modélise les neutres générés par la recombinaison du plasma au contact de la paroi. SOLEDGE3X résout aussi un bilan de courant pour calculer le champ électrique au sein du plasma. Combiné à des*

phénomènes de polarisation, l'interaction du plasma avec le champ électrique génère des instabilités type Rayleigh-Besnard pour former des structures se propageant radialement à l'origine du transport turbulent dans le plasma de bord. Du point de vue numérique, la détermination du potentiel électrique est aujourd'hui l'opération la plus coûteuse en temps de calcul. Le problème peut être vu comme un Laplacien 3D anisotrope (avec une diffusion dans la direction parallèle au champ magnétique plusieurs millions de fois plus grande que dans la direction transverse) dont l'inversion devient très coûteuse sur de gros maillages. Différents solveurs ont été testés : solveurs directes (PASTIX), solveurs itératifs (PETSC, HYPRE...). Les meilleures performances ont été obtenues avec les solveurs itératifs utilisant des préconditionneurs « algébriques multi-grilles » (PETSC-GAMG, HYPRE-BoomerAMG, AGMG développé à ULB). Néanmoins, les performances actuelles ne permettent pas d'atteindre un temps de calcul raisonnable pour les résolutions nécessaires pour simuler ITER voire même WEST. Bien que parallélisés, les performances de ces solveurs appliqués à notre problème plafonnent très vite (dès la centaine de CPUs). Le travail de la thèse sera donc consacré essentiellement à l'optimisation de l'inversion de cet opérateur Laplacien anisotrope.

Plusieurs pistes seront à l'étude. Dans un premier temps et pour prendre en main le code, un profiling des performances des solutions actuellement implémentées sera effectué. L'objectif sera alors de comprendre pourquoi la parallélisation est peu efficace et voir s'il est possible de l'améliorer. Ce travail pourra être réalisé en collaboration avec ULB qui développe le solveur AGMG. Une étude profonde du problème mathématique sera ensuite réalisée pour chercher un préconditionneur adapté à notre problème. En parallèle de cette étude plus fondamentale, de nouvelles bibliothèques pourront être testées, notamment sur GPUs (solveur algébrique-multigrille de NVIDIA [AMGX], version GPU de HYPRE-BoomerAMG). Cette étape constituera le premier pas pour porter SOLEDGE3X vers les architectures de calcul hybrides CPU-GPU privilégiées sur les supercalculateurs actuels.

Le travail de thèse se fera en collaboration entre l'IRFM et le M2P2, deux laboratoires historiquement impliqués dans le développement du code SOLEDGE3X. Une collaboration avec ULB lancée dans le cadre du projet européen EoCoE se poursuivra, axée sur l'utilisation de la bibliothèque AGMG. L'ensemble des travaux réalisés sur le code SOLEDGE3X seront aussi valorisés au sein du projet TSVV porté par EuroFusion sur le développement des codes pour le plasma de bord.

#### **Collaborations scientifiques et/ou partenariats industriels envisagés :**

- Nom du collaborateur: M2P2-CNRS et Université Libre de Bruxelles
- Organisme/Société:
- Raison de la collaboration:

*Le laboratoire M2P2 à Marseille possède une expertise reconnue dans la simulation du plasma de bord et collabore de longue date avec l'IRFM à l'élaboration d'outils pour modéliser la turbulence plasma. Une collaboration avec l'Université Libre de Bruxelles est aussi envisagée pour renforcer la collaboration dans le développement de la bibliothèque AGMG (solveur algébrique multigrille développé à ULB).*