

Habilitation à Diriger des Recherches :

The GYSELA project: A semi-Lagrangian code addressing gyrokinetic

full-f global simulations of flux driven tokamak plasmas

V. Grandgirard

Dans les machines à fusion telles que les tokamaks, le gain de puissance augmente non-linéairement avec le temps de confinement de l'énergie. La qualité de confinement énergétique du plasma détermine alors largement la taille et donc le coût d'un réacteur à fusion. Ce temps de confinement est principalement gouverné par la turbulence plasma existant dans les tokamaks --induisant des fluctuations d'une amplitude de quelques pourcents dans le coeur du plasma-- mais aussi le transport associé. Comprendre l'origine de cette turbulence et ses propriétés en vue d'un possible contrôle est l'un des problèmes critiques pour la fusion par confinement magnétique.

Le modèle le plus approprié pour simuler ces plasmas faiblement collisionnels est un modèle cinétique. Dans les descriptions premiers principes des plasmas, une équation à six dimensions (3 coordonnées de position et 3 de vitesse) --de Vlasov ou Fokker-Planck-- est résolue pour la fonction de distribution de chaque espèce et couplée de manière auto-consistante aux équations de Maxwell décrivant les champs électromagnétiques. Par chance, dans les plasmas de fusion, les fluctuations turbulentes se développent à des fréquences typiques beaucoup plus faibles que la fréquence cyclotronique. Le problème 6D peut ainsi être réduit à un problème 5D. Malgré cette réduction d'une dimension, la construction d'outils de simulations basés sur ces principes reste très complexe et donc peu répandue. Moins de 15 codes gyrocinétiques 5D sont développés activement dans le monde, dont 4 sont européens.

Cette HDR retrace le développement d'un tel code depuis 2001 à l'IRFM (Institut de Recherche sur la Fusion Magnétique) au CEA de Cadarache. Le code GYSELA (pour GYrokinetic SEmi-LAgrangian) permet de résoudre les équations gyrocinétiques pour plusieurs espèces ioniques dans la limite électrostatique (pas de fluctuations du champ magnétique). Les spécificités du code sont d'être global (simulation de l'ensemble du tore), de ne pas faire d'approximation de séparation d'échelle (code full-f) et de forcer la turbulence via des sources de particules, moment et de chaleur (par opposition aux codes qui fixent les gradients de densité, de vitesse et de température). Le code est de plus basé sur une méthode semi-Lagrangienne (qui correspond à un mixe entre l'approche Particle-In-Cell la plus répandue et l'approche eulérienne). Toutes ces propriétés en font un code unique en son genre. Comme tous les autres codes gyrocinétiques, il utilise de manière intensive les super-calculateurs et nécessite les techniques de pointe en calcul massivement parallèle.

Un tel projet n'aurait donc pas été possible sans une collaboration forte entre mathématiciens, physiciens et informaticiens. Cette HDR est donc à l'interface entre trois domaines scientifiques que sont la physique de la turbulence plasma, les méthodes numériques pour les équations cinétiques et le calcul haute performance (HPC).