

Améliorer les capacités prédictives des outils de simulation numérique pour les plasmas de fusion magnétique grâce à des modèles réduits pour la turbulence

G. Ciraolo¹, H. Bufferand¹, Ph. Ghendrih¹, S. Baschetti¹, N. Fedorczak¹, P. Tamain¹, E. Serre²

¹ CEA, IRFM, St Paul Lez Durance, France

² Aix-Marseille Univ., CNRS, Centrale Marseille, M2P2, Marseille, France

guido.ciraolo@cea.fr

L'exploitation scientifique d'ITER doit s'appuyer sur des outils de modélisation décrivant au mieux les phénomènes physiques en jeu. La prédiction des propriétés du plasma dans la couche limite en interaction avec la paroi, appelé plasma de bord, est un des points critiques dans le développement d'une centrale à fusion. D'une part la largeur de cette couche limite est un paramètre clef pour déterminer le maximum de flux de chaleur impactant les éléments de paroi et par conséquent leur temps de vie. D'autre part, en fonction de la puissance injectée, le plasma peut transiter dans un régime à confinement amélioré, caractérisé par l'établissement d'une barrière de transport dans cette région périphérique, avec une réduction du transport turbulent et de la largeur de la couche limite. La modélisation de ces phénomènes repose aujourd'hui sur un ensemble d'outils numériques qui vont d'un temps d'exécution court avec une description du plasma basée sur des modèles réduits, jusqu'à des outils prenant en compte de phénomènes physiques caractérisés par des échelles spatiales et temporelles beaucoup plus petites comme la turbulence mais avec des temps d'exécution beaucoup plus longs. Dans ce contexte, en prenant inspiration de ce qu'avait été fait en mécanique des fluides neutres [1], nous avons développé une approche capable d'améliorer les capacités de prédiction des codes dits de transport pour le plasma de bord sans diminuer leur efficacité en termes de temps de calcul. Ces codes de transport sont couramment utilisés pour l'interprétation des expériences dans les machines de fusion magnétique, ayant la possibilité de bien traiter les phénomènes d'interaction plasma paroi ainsi que la dynamique du plasma dans la direction parallèle au champ magnétique. Toutefois, afin de rendre le temps d'exécution raisonnable par rapport aux codes dits de turbulence (quelques jours plutôt que quelques mois), la dynamique du plasma dans la direction orthogonale au champ magnétique est traitée comme de la diffusion, avec des coefficients ad hoc choisis pour reproduire les profils expérimentaux et donc sans possibilité de prédire la valeur de ces coefficients pour de futures expériences. Dans cette approche essentiellement interprétative, la valeur en chaque point de l'espace du coefficient de transport est un paramètre libre. Nous avons élaboré une approche pour réduire le nombre de paramètres libres. L'idée est de rajouter deux équations de transport, une pour l'énergie cinétique turbulente κ , et une autre pour son taux de dissipation ϵ . La dynamique locale de ces deux champs rappelle les modèles proie-prédateur [2] ainsi que les équations d'amplitude. Déterminés de façon auto-cohérente par les équations physiques introduites ci-dessus, ces champs permettent d'évaluer un coefficient de diffusion proportionnel à $\frac{\kappa^2}{\epsilon}$ en tout point de l'espace. Même si ce modèle turbulent est simplifié, il permet d'aller au-delà de l'approche purement interprétative pour les coefficients de diffusion et il confère une nouvelle capacité prédictive aux codes de transport pour un temps de calcul pratiquement inchangé. Le modèle k-epsilon a été implémenté dans le code SOLEDGE [3] dans sa version champ moyen permettant la comparaison avec les résultats des simulations 3D de turbulence ainsi qu'aux données expérimentales existantes, dans les tokamaks TCV et WEST notamment [4].

Références

1. B.E. LAUNDER AND D.B. SPALDING, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* , **3**, 269, (1974).
2. K. MIKI *et al.*, *Physics of Plasmas* , **19**, 092306, (2012).
3. H. BUFFERAND *et al.*, *Contrib. Plasma Phys.* , **56**, 555, (2016).
4. S. BASCHETTI *et al.*, *Nuclear Fusion*, **61**, 106020 , (2021).