

# Méthode numérique pour la simulation "Full-Wave" dans un tokamak

Rihab DAADAA, Université de Lorraine

La production d'énergie en utilisant les réactions de fusion fait l'objet de recherches en physique des plasmas. Elles éviteraient, si elles pouvaient devenir disponibles industriellement, les risques essentiels associés à l'énergie de fission (risque d'emballement, risque de prolifération, déchets radioactifs, etc,...). Les expériences abordées dans ce domaine ont révélé que les réacteurs à configuration magnétique toroïdale, dite tokamak, sont les plus efficaces. Récemment, d'importants programmes de recherche se sont développés sur la fusion par confinement magnétique.

Les réactions de fusion nécessitent des techniques de chauffage à des températures très élevées. Plusieurs techniques ont été explorées: l'effet Joule, l'injection de particules neutres et l'injection d'ondes électromagnétiques. On s'intéresse à cette dernière technique.

Dans cette communication, on présente une méthode de décomposition de domaines pour simuler la propagation de l'onde électromagnétique qui avoisine la fréquence de résonance hybride-basse (Lower-Hybrid L-H) calculée au centre d'un plasma fortement magnétisé.

La simulation Full-Wave, c'est-à-dire, la résolution directe des équations de Maxwell décrivant la propagation des ondes L-H est un défi stimulant. D'une part, la longueur d'onde est faible par rapport aux dimensions de l'enceinte de confinement du plasma et d'autre part, le milieu est non homogène et anisotrope.

Nous avons développé un algorithme d'éléments finis en utilisant une méthode de décomposition de domaines sans recouvrement qui résout les équations de Maxwell harmoniques en imposant explicitement la condition de divergence.

Dans le modèle considéré, les ondes sont émises par des antennes simulées par des conditions limites essentielles ou naturelles. Le tenseur de réponse du plasma est déduit d'une approximation de type plasma froid du tenseur de permittivité diélectrique. Les expressions des éléments de la matrice sont fonctions de la fréquence du plasma, des fréquences cyclotron de chaque espèce (ions et électrons), de la fréquence de collision, de densité du plasma et du champ de confinement. Ce tenseur est complexe et non hermitien dès que les collisions et l'amortissement Landau sont pris en compte.

On a choisi une formulation variationnelle mixte qui impose la condition de divergence du champ électrique et contrôle les phénomènes de "charge d'espace". Les conditions d'interface entre les sous-domaines sont dualisées en utilisant des multiplicateurs de Lagrange [2].

Cette formulation multi-domaines est bien posée et est équivalente à la formulation mono-domaine [3].

Sur chaque sous-domaine, elle est discrétisée en utilisant des éléments finis de Taylor-Hood [1].

Le système linéaire résultant impliquant tous les sous-domaines, est un problème de point-selle généralisé, où la matrice est creuse par blocs et non-hermitienne. Chaque bloc est associé à un sous-domaine et à son tour, à un problème de type point-selle généralisé.

Le système linéaire est résolu en utilisant un algorithme GMRES préconditionné couplé à une résolution par une méthode directe sur chaque sous domaine.

On présente une série de tests numériques.

## Références

- [1] F. ASSOUS, P. DEGOND, E. HEINTZÉ, P.A. RAVIART, AND J. SEGRE, *On a finite Element Method for Solving the Three-Dimensional Maxwell Equations*. J. Comput. Phys., vol. 109, pp. 222-237, 1993.
- [2] F. ASSOUS, J. SERGÉ AND E. SONNENDRUCKER , *A domain decomposition method for parallelization of a three-dimensional Maxwell solver based on a constrained formulation*, Mathematics and Computers in Simulation, vol. 81, pp. 2371-2388, 2011.
- [3] A. BACK, T. HATTORI, S. LABRUNIE, J.R. ROCHE AND P. BERTRAND, *Electromagnetic wave propagation and absorption in magnetise plasmas: variational formulation and domain decomposition*, M2AN, 49, no. 5 pp. 1239-1260, 2015.

**Rihab DAADAA**, Université de Lorraine, IECL, B.P. 70239, 54506 Vandoeuvre lès Nancy Cedex.

rihab.zammit-chatti@univ-lorraine.fr