

Méthodes numériques pour l'hydrodynamique lagrangienne appliquées à la simulation de la fusion par confinement inertiel

Le Code d'hydrodynamique et d'implosion du CELIA (CHIC) a été développé depuis 2003 au laboratoire pour dimensionner et restituer des expériences de physique des plasmas créés par laser, dans le domaine de la fusion par confinement inertiel (FCI). Ce code de simulation est la concrétisation d'un travail approfondi qui a permis la mise au point de schémas numériques novateurs, précis et robustes pour l'hydrodynamique Lagrange et la diffusion.

P.-H. Maire • J. Breil • S. Galera • G. Schurtz Centre Lasers Intenses et Applications (CELIA), UMR 5107 Université Bordeaux 1 - CNRS - CEA

Le code CHIC

L'organigramme de ce code d'hydrodynamique Lagrangien bidimensionnel est présenté en **figure 1**. Dans ce code, l'évolution du plasma est décrite à l'aide d'une modélisation fluide à deux températures (ionique et électronique). Le transport de l'énergie électronique est assuré par le modèle de diffusion de Spitzer-Härm avec limiteur de flux. La propagation des faisceaux laser au sein du plasma sous-dense est calculée par un algorithme de lancer de rayons tri-dimensionnel qui prend en compte la réfraction ainsi que l'absorption collisionnelle. Les champs magnétiques transverses auto-générés sont évalués à l'aide d'un modèle de magnétohydrodynamique (MHD) résistive qui découle d'une loi d'Ohm généralisée. Le couplage avec le

transport d'énergie électronique est effectué *via* le modèle de conduction de Braginskii. Le flux d'énergie radiative est obtenu dans le cadre d'une approximation du type diffusion multi-groupe de l'équation du transfert radiatif. Différents modèles de matière tabulés sont disponibles pour les équations d'états et les opacités. Pour plus de détails sur les modèles physiques le lecteur pourra se reporter à la référence [1].

Le noyau hydrodynamique

Le module d'hydrodynamique repose sur une description Lagrangienne des équations de la dynamique des gaz. Dans ce formalisme les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie totale sont résolues

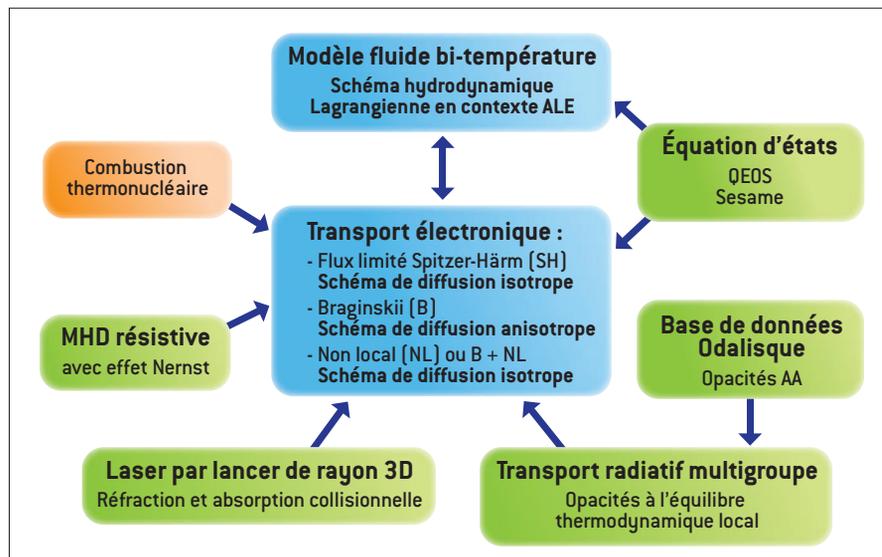


Figure 1. Organigramme du code CHIC avec les principaux modules de physique dédiés.

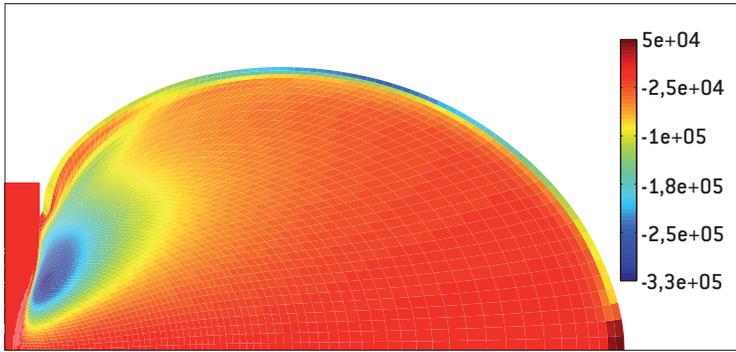


Figure 2. Champ magnétique auto-généré par les gradients croisés de densité et de température. La prise en compte du champ magnétique dans le transport des électrons par le modèle de Braginskii, ajouté à l'effet Righi-Leduc, se fait grâce au schéma de diffusion anisotrope implémenté dans le code CHIC.

à l'aide d'une méthode du type volume fini sur un maillage mobile qui se déplace à la vitesse du fluide. Nous avons développé un schéma centré aux mailles dans lequel les flux numériques sont calculés de manière compatible avec le déplacement du maillage. Ce schéma numérique est conservatif et vérifie une inégalité entropique qui assure sa cohérence avec le second principe de la thermodynamique. Son extension d'ordre élevé est obtenue en utilisant la résolution du problème de Riemann généralisé [2]. La généralisation à la géométrie axisymétrique est décrite dans [3]. Pour accroître la robustesse du code, nous avons développé une stratégie du type Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE). Cette approche combine une phase Lagrangienne suivie d'une phase de régularisation permettant de restaurer la qualité géométrique du maillage Lagrangien et se termine par une phase d'interpolation conservative des variables physiques de la grille Lagrangienne vers la grille régularisée. La prise en compte des écoulements multi-matériaux s'effectue à l'aide d'une méthode de reconstruction d'interface basé sur un suivi Lagrangien des fractions de volume de chaque matériau.

Le noyau de diffusion

Les équations d'énergie électronique, ionique, radiative ainsi que l'équation de MHD résistive requièrent la résolution d'une équation de diffusion bidimensionnelle. Les schémas du type volume fini usuels souffrant d'un défaut réhibitoire sur des grilles Lagrangiennes fortement déformées (i.e. les isothermes suivent les lignes de maillage), nous avons développé une discrétisation volume fini robuste et précise pour corriger ce défaut. Cette discrétisation est basée sur une formulation variationnelle locale qui permet de construire une approximation multi-points du flux de chaleur suffisamment précise. Des expériences numériques ont montré que cette méthode est quasiment d'ordre deux pour des maillages non structurés quelconques [4]. L'extension au cas de la diffusion anisotrope pour le modèle de conduction de Braginskii a été développée (figure 2).

Conclusion

Une validation numérique intensive des différents modules de ce code a été conduite à l'aide de cas tests représentatifs (figure 3). La validation physique de ce code a été acquise par le dimensionnement et l'interprétation de nombreuses expériences de physique des plasmas dans le domaine de la FCI [5].

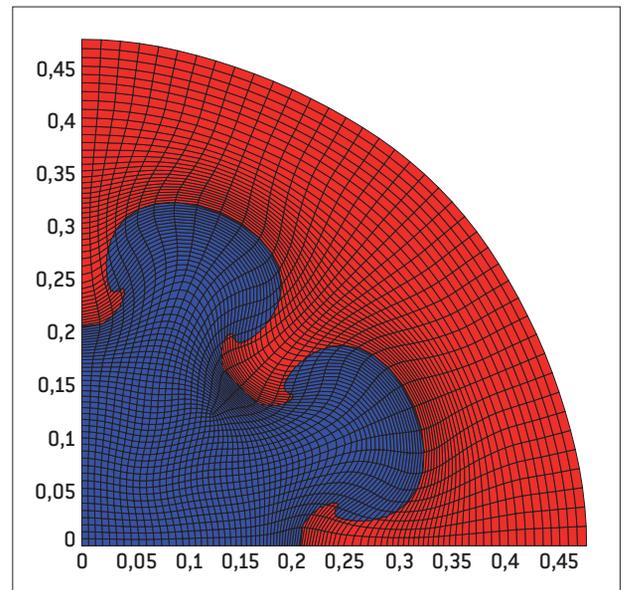


Figure 3. Développement de l'instabilité de Rayleigh-Taylor lors de la compression d'une cible cylindrique. L'utilisation de la reconstruction d'interface et de l'Ale sur maillage non structuré permet de conduire ce calcul jusqu'à son terme.

RÉFÉRENCES

- [1] R. DAUTRAY, J. WATTEAU, "La fusion thermonucléaire inertielle par laser", Eyrolles (1991).
- [2] P.-H. MAIRE, "A high-order cell-centered Lagrangian scheme for two-dimensional compressible fluid flows on unstructured meshes", *J. Comput. Phys.*, **228**, p. 2391-2425 (2009).
- [3] P.-H. MAIRE, "A high-order cell-centered Lagrangian scheme for compressible fluid flows in two-dimensional cylindrical geometry", *J. Comput. Phys.*, **228**, p. 6882-6915 (2009).
- [4] J. BREIL, P.-H. MAIRE, "A cell-centered diffusion scheme on two-dimensional unstructured meshes", *J. Comput. Phys.*, **224**, p. 785-823 (2007).
- [5] S. ATZENI *et al.*, "Studies on targets for inertial fusion ignition demonstration at the HiPER facility", *Nuclear Fusion*, **49**(5), 055008 (2009).