

# Modélisation cinétique de l'allumage en FCI: une approche multi-échelle

B. PEIGNEY - O. LARROCHE / CEA – DAM Île-de-France

V. TIKHONCHUK / Centre lasers intenses et applications (CELIA), UMR 5107 CNRS – CEA – Université de Bordeaux 1, Talence

Une méthode originale a été conçue pour modéliser le processus d'allumage de cibles de deutérium-tritium dans le contexte de la fusion par confinement inertiel (FCI). On cherche ainsi à décrire le phénomène d'ignition au niveau cinétique, par une approche de type Fokker-Planck appliquée à la fois aux ions thermiques du plasma et aux particules  $\alpha$  créées par réaction de fusion. La différence des échelles de vitesse entre les particules thermiques et les particules suprathermiques produites par fusion nous conduit à développer une stratégie multi-échelle consistant à traiter simultanément et conjointement les deux échelles caractéristiques. La méthode multi-échelle a donné naissance à un nouveau code cinétique « Fuse » (FPion Upgrade with two Scales of Energy), construit sur la base du code FPion [1].

La conception des cibles et l'interprétation des expériences FCI s'appuient sur des codes résolvant numériquement des modèles de type fluide ou hydrodynamique. Ce type d'approche est pertinent lorsque le libre parcours des particules est petit devant la longueur caractéristique du système. Si cette condition est bien respectée pour les particules thermiques (ions D,T), ce n'est pas le cas des particules suprathermiques dont le libre parcours moyen est de l'ordre de la taille caractéristique du système. Une approche cinétique, basée sur les fonctions de distribution des particules, est donc a priori requise pour traiter les produits de fusion de façon précise. Notre objectif est de développer une modélisation cinétique du processus d'ignition et de combustion des cibles, tout en conservant des temps de résolution numérique raisonnables en vue de l'application à des configurations réalistes de cible.

## Séparation des échelles de vitesse

La difficulté d'une telle approche réside dans le couplage entre des populations ioniques caractérisées par des échelles d'énergie très différentes (figure 1) :

- ▶ les ions dits thermiques D, T, caractérisés par une énergie de l'ordre du keV et formant l'essentiel de la masse du plasma en implosion ;
- ▶ les particules  $\alpha$  suprathermiques, créées à 3,52 MeV par les réactions de fusion.

Le problème à traiter est donc caractérisé par deux échelles d'énergie couplées. Pour le résoudre, on développe une technique multi-échelle [2] spécifique basée sur l'analyse du processus de ralentissement des particules rapides décrit par l'équation de Vlasov-Fokker-Planck. Plus précisément, on montre [2] que l'on peut décomposer la fonction de distribution des particules  $\alpha$  sous la forme de deux composantes :

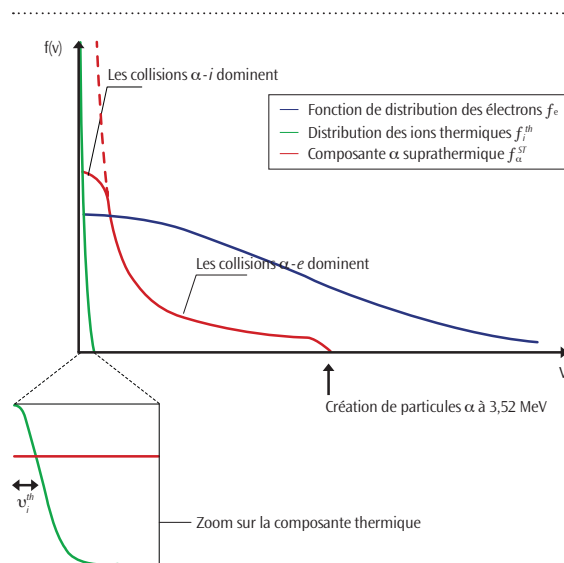
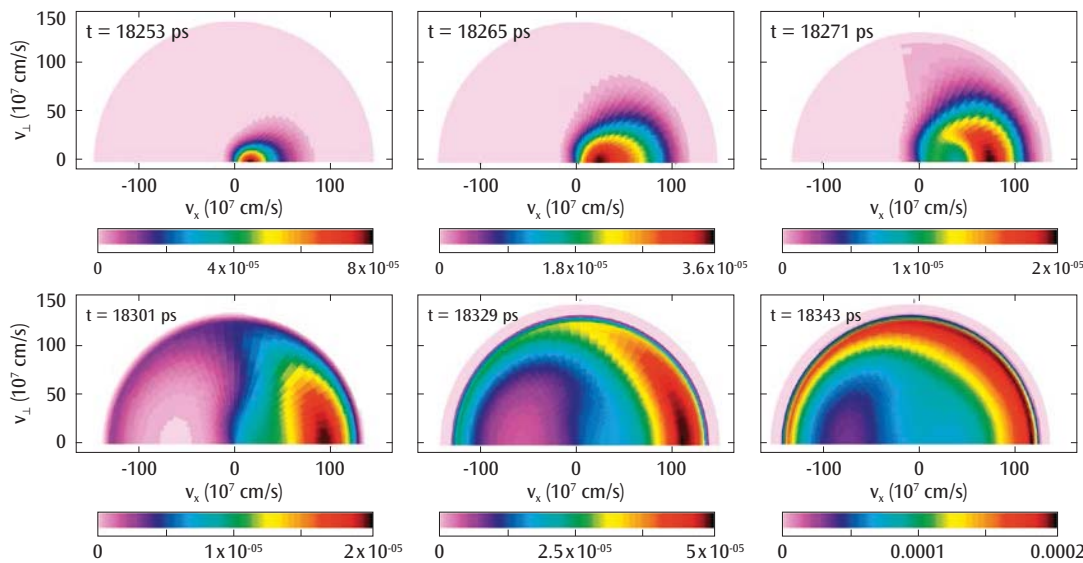


Figure 1. Représentation schématique de la relaxation collisionnelle des particules  $\alpha$  sur les ions cibles thermiques.

- ▶ une composante suprathermique (représentée sur la figure 2 pendant le processus de combustion observé localement), évoluant sur un large domaine de vitesses, mais avec une échelle de variation relativement lente. Cette composante est alors discrétisée sur un maillage en vitesse étendu avec un pas relativement grossier ;

- ▶ une composante thermique, qui évolue rapidement sur un support localisé de l'espace des vitesses, concentré dans le domaine des vitesses thermiques. Un maillage en vitesse localisé autour du domaine thermique avec un pas fin est requis pour décrire cette échelle de vitesse.



**Figure 2.** Évolution temporelle de la composante suprathermique des particules  $\alpha$  pendant le processus de combustion, observée en suivant de manière lagrangienne une cellule du point chaud. La composante suprathermique est peuplée à 3,52 MeV par les réactions de fusion. L'anisotropie vers les vitesses radiales positives est liée à l'inhomogénéité du terme source, plus piqué au centre. La cellule d'observation est ici légèrement décentrée, de sorte que l'on voit passer les particules de gauche à droite. Les particules suprathermiques déposent leur énergie dans une cellule située à la périphérie du point chaud.

Cette technique de décomposition nous permet de mieux répartir l'effort de calcul, en discrétisant chaque composante sur un maillage adapté à l'échelle de variation à traiter. À partir de l'écriture du système, on déduit une méthode numérique pour résoudre le couplage entre les deux échelles d'énergie, découlant naturellement de la forme des termes de l'opérateur de Fokker-Planck [3]. La méthode traite ainsi conjointement, mais de façon couplée, les deux échelles de vitesse. La forme du couplage est en fait dictée par la structure de l'opérateur de Fokker-Planck modélisant les collisions entre les différentes espèces de particules chargées [3].

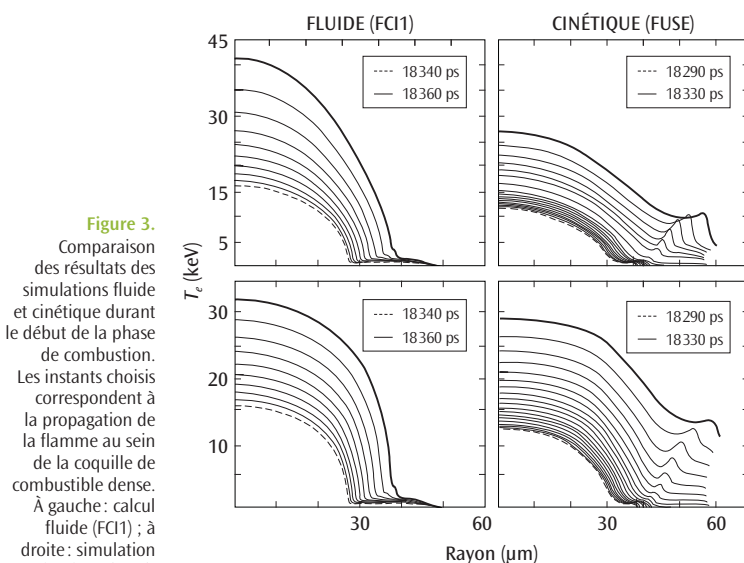
### Effets cinétiques ioniques sur l'allumage et la combustion en FCI

Durant le processus de combustion, les effets cinétiques associés aux particules  $\alpha$  suprathermiques modifient significativement la structure de la flamme. En particulier, l'aspect non-local du trans-

port des particules rapides est mis en évidence par la modélisation cinétique. Les particules  $\alpha$  suprathermiques déposent leur énergie et leur quantité de mouvement principalement hors du point chaud, dans une région correspondant à l'entrée de la coquille de combustible dense [4].

Il s'ensuit une modification importante de la structure de la flamme de combustion (figure 3), caractérisée par la présence d'un précurseur liée au transport non-local des produits de fusion. La propagation de l'onde de combustion et les performances globales de la combustion sont alors significativement impactées. Le dégagement d'énergie est beaucoup moins élevé (réduction de l'ordre de 40 à 50 %), ce qui apparaît dans les calculs cinétiques comme une conséquence directe du transport non-local des particules suprathermiques.

Ce nouvel effet physique mis en évidence par l'approche multi-échelle du problème du ralentissement des particules rapides peut constituer une piste d'explication rendant compte des difficultés rencontrées aujourd'hui dans l'atteinte de l'ignition des configurations actuelles de cibles de FCI.



**Figure 3.** Comparaison des résultats des simulations fluide et cinétique durant le début de la phase de combustion. Les instants choisis correspondent à la propagation de la flamme au sein de la coquille de combustible dense. À gauche : calcul fluide (FC1) ; à droite : simulation cinétique (Fuse).

## Références

- [1] M. CASANOVA, O. LARROCHE, J.-P. MATTE, "Kinetic study of a shock wave in a high temperature plasma", *Phys. Rev. Lett.*, **67**, 2143 (1991).
- [2] B. PEIGNEY, « Contribution à l'analyse de problèmes multi-échelles : application à des processus de combustion et de diffusion », Thèse de l'université Paris Diderot (2015).
- [3] B. PEIGNEY, O. LARROCHE, V. TIKHONCHUK, "Fokker Planck kinetic modeling of  $\alpha$  suprathermal particles in a fusion plasma", *Journal of Computational Physics*, **278**, 416-444 (2014).
- [4] B. PEIGNEY, O. LARROCHE, V. TIKHONCHUK, "Ion kinetic effects on the ignition and burn of ICF targets: a multi-scale approach", *Phys. Plasmas*, **21**, 22709 (2014).