

Formation doctorale "Descriptions fluide et cinétique des plasmas"

G. Belmont (CETP), R. Grappin (Luth, Meudon), F. Pantellini (Lesia, Meudon)

L. Rezeau (responsable de la formation, prof. UPMC).

Plusieurs modèles physiques sont possibles pour décrire les plasmas non-collisionnels des milieux dilués comme la couronne solaire, la magnétosphère terrestre ou le vent solaire. Le but de cette formation d'une semaine au CIAS (Centre International d'Ateliers Scientifiques à l'Observatoire de Paris-Meudon) est de permettre aux étudiants en thèse de se familiariser avec les modèles cinétiques (particulaires) et fluide (MHD) afin de comprendre les limites et les vertus de chacun et les utiliser à bon escient. La formation est assurée par des chercheurs du Cctp et des astronomes de l'Observatoire de Meudon. Un ou deux intervenants extérieurs font une conférence pendant l'atelier.

Le régime "non-collisionnel" qui régit les plasmas dilués apparaît parce que les interactions entre particules individuelles ("collisions") deviennent négligeables; le couplage entre particules est alors assuré par le champ électromagnétique collectif. Dans ce cas, la distribution des vitesses particulières peut s'écarter notablement de la distribution maxwellienne, et en principe la description fluide (densité, vitesse, température) ne suffit plus. Cependant, parce qu'elle est bien plus économique, il est tentant de l'utiliser en-dehors de son domaine de validité.

Pour pouvoir en connaissance de cause choisir son outil, il faut comparer en détail les deux approches. La problématique de la formation consiste donc à explorer les **différences entre les modèles fluide et particulaire pour décrire les plasmas sans collision.**

Le fil conducteur de l'atelier est la question du transport du plasma à travers la magnétopause (frontière magnétique isolant le voisinage de la Terre du vent solaire), étudiée il y a quelques années dans deux articles de Ma et al., et Savoini et al. 1994, qui simulaient le percement de l'enveloppe magnétique de la terre (magnétopause) par un boulet de plasma. Ces travaux concluaient qu'une petite fraction (1/50) de l'énergie cinétique initiale seulement était disponible pour lutter contre l'élasticité du champ magnétique transverse de la frontière et la "crever" par reconnexion. En fait, cette perte d'énergie est un phénomène général, lié à la difficulté du transport de matière dans un fluide, collisionnel ou non, avec ou sans frontière. Cette problématique du transport est d'abord illustrée (ci-dessous) via des expériences à une dimension d'espace.

Les expériences numériques se font en utilisant d'une part un code numérique fluide (MHD), d'autre part un code particulaire PIC hybride (ions particulières, électrons sans masse).

Quelques expériences autour de la question du transport de matière

Nous abordons successivement: la propagation purement balistique (électrons froids), la propagation et l'amortissement d'une onde acoustique ionique; la formation d'un choc parallèle; la résonance ondes-particules (Landau et ion-cyclotron); la propagation d'un boulet de plasma à travers un plasma homogène, puis enfin à travers un plasma modélisant le voisinage de la magnétopause.

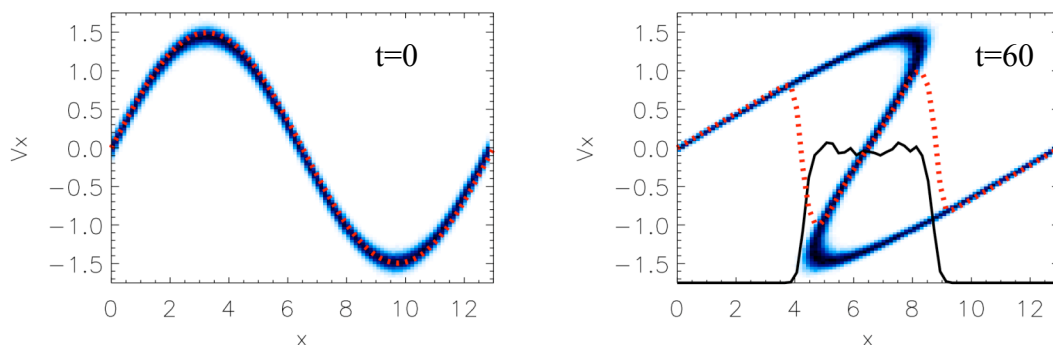


Fig. 1 Simulation d'ions balistiques. Evolution d'une population d'ions froids le long d'un axe à partir d'une forte fluctuation de vitesse (Mach élevé). Les électrons sont froids également, si bien que le champ électrique est nul. A gauche, conditions initiales; à droite, temps 60. Couleur: densité d'ions dans l'espace des phases (x, v_x) ; pointillés: vitesse fluide $u_x(x)$; noir: pression des ions $P(x)$ (unités arbitraires, minimum=0). Le rattrapage (déferlement) des ions lents par les ions rapides génère une pression qui repousse le fluide, comme dans un fluide collisionnel de pression non nulle. Et ceci, bien que les ions aient des trajectoires balistiques (sans force). Unité de distance: c/ω_{pi} .

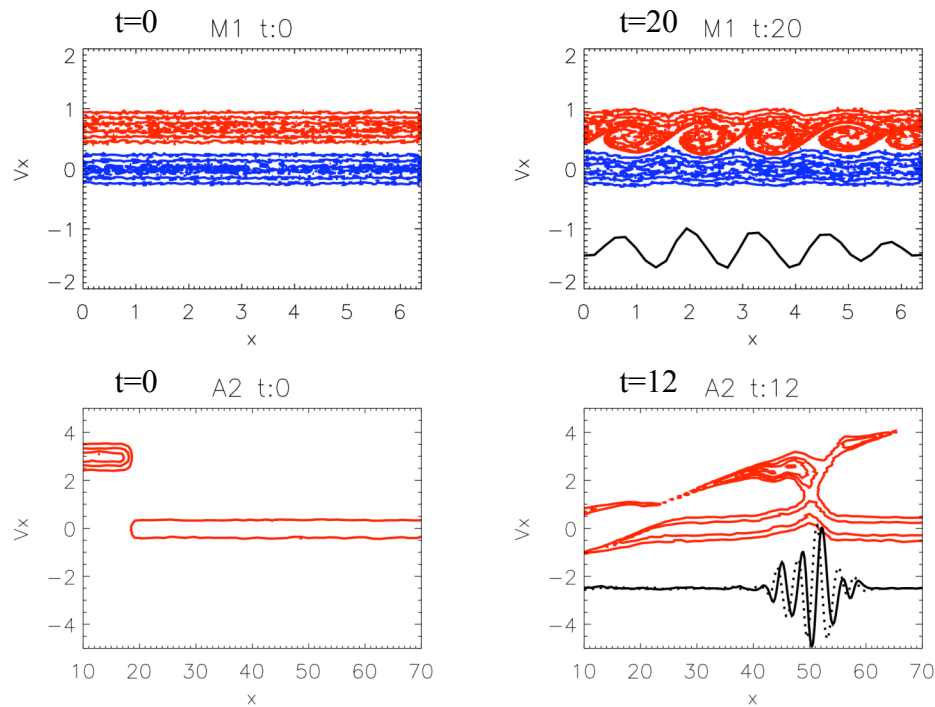


Fig. 2 Deux simulations particulières avec résonance. Deux exemples de mélange rapide des vitesses particulières via des ondes instables. Couleur: densité de particules dans l'espace (x, v_x) . En haut: double population d'ions ("double faisceau", respectivement en rouge et en bleu), apparition d'ondes acoustiques ioniques au temps $t=20$ à droite (champ électrique horizontal E_x , en noir). En bas: déferlement d'un saut de vitesse; $t=0$ à gauche; apparition d'ondes whistler au temps $t=12$ à droite, avec profils des deux composantes perpendiculaires du champ électrique en noir.

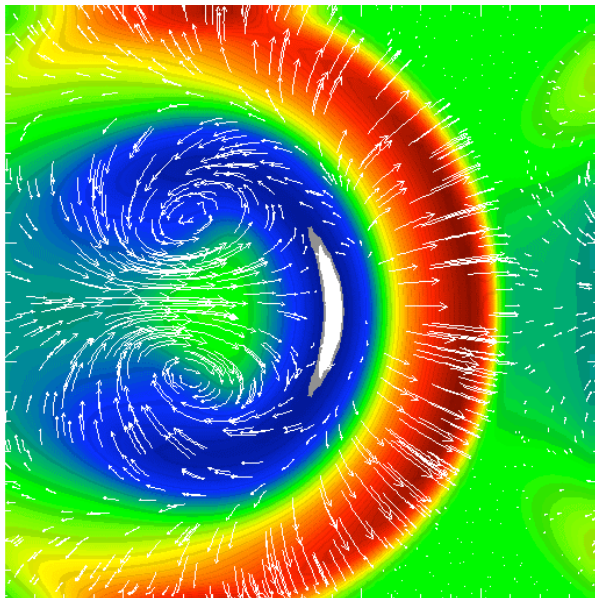


Fig.3 Simulation MHD d'un boulet de plasma de Mach initial 0.73 et de densité double du plasma extérieur. Couleur: densité. Une grande partie de l'énergie cinétique initiale est donnée à l'onde de pression (en arc), qui se propage vite mais ne transporte pas de matière; le gros du transport est assuré par les deux tourbillons dont l'énergie cinétique de translation n'est qu'une faible fraction de l'énergie initiale : il faut dépenser beaucoup d'énergie pour bien mélanger un plasma collisionnel. Cela est-il vrai aussi pour un plasma non collisionnel ?

Bibliographie

Savoini, Ph., Scholer, M., Fujimoto, M., Two-dimensional hybrid simulations of impulsive plasma penetration through a tangential discontinuity, J. Geophys. Res. 99, 19377, 1994
 Ma, Z. W., J. G. Hawkins, and L. C. Lee, A simulation study of impulsive penetration of solar wind irregularities into the magnetosphere at the dayside magnetopause, J. Geophys. Res., 96, 15,751, 1991.