

Titre

Analyse asymptotique de modèles fluides fortement magnétisés pour la reconnexion magnétique.

Title

Asymptotic analysis of strongly magnetized fluid models for magnetic reconnection.

Mots clés

Plasmas fortement magnétisés et anisotropes ; Systèmes d'Euler-Maxwell à deux fluides ; Magnétohydrodynamique idéale et étendue ; Limites singulières ; Limites incompressibles de modèles compressibles ; Reconnexion magnétique.

Keywords

Strongly magnetized and anisotropic plasmas ; Euler-Maxwell two-fluids system ; Ideal and extended magnetohydrodynamics ; Singular limits ; Incompressible limits of compressible models ; Magnetic reconnection.

Thématiques/Domaines

Mathématiques appliquées (Equations aux dérivées partielles EDPs, Analyse des EDPs, Analyse asymptotique, Analyse fonctionnelle), Mécanique des fluides (Géophysique), Physique des plasmas (Plasmas magnétisés de fusion par confinement magnétique et inertiel, Plasmas spatiaux et astrophysiques, Géo-dynamo).

Thematics/Domains

Applied mathematics (Partial differential equations PDEs, Analysis of PDEs, Asymptotic analysis, Functional analysis), Fluid mechanics (Geophysics), Plasma physics (Magnetized plasmas of fusion by magnetic and inertial confinement, Space and astrophysical plasmas, Geo-dynamo).

Contexte et Projet de Thèse (objectifs, méthodes et résultats attendus)

Ce sujet de thèse porte sur l'analyse mathématique du 4^{ème} état de la matière : les plasmas qui représentent plus de 99% de la matière visible dans l'univers. Un problème resté mystérieux les concernant porte sur le phénomène de « reconnexion magnétique » grâce auquel l'énergie magnétique peut-être convertie en énergie cinétique et thermique. La reconnexion magnétique (en particulier celle appelée « rapide » ou « non collisionnelle ») est identifiée comme étant un processus responsable des oscillations en dents de scie qui peuvent entraîner des pertes de chaleur et/ou de particules voire même des phénomènes de disruption dans les plasmas de fusion par confinement magnétique tels que les plasmas de tokamaks (e.g., ITER) ou de stellarateurs (e.g., Wendelstein 7-X). Il en résulte une dégradation voire une perte du confinement qui limite ou stoppe les réactions de fusion. Rappelons que la fusion thermonucléaire par confinement magnétique est considérée comme une nouvelle source d'énergie propre (zéro émission carbone, pas de déchet radioactifs contrairement à la fission thermonucléaire) et abondante, possiblement accessible dans les décennies à venir. On observe ces mêmes phénomènes violents de disruption dans les plasmas spatiaux et astrophysiques tels que les éruptions solaires.

Certains aspects de la reconnexion magnétique peuvent être explorés via l'étude des limites incompressibles. Il s'agit d'identifier quel est le comportement asymptotique en temps long (en $1/\varepsilon$, avec $0 < \varepsilon \ll 1$) d'un système dynamique (les équations d'Euler-Maxwell bi-fluide) sous l'impact de petites perturbations (d'amplitude ε) d'un état stationnaire fixé. Ce problème de limite singulière peut être d'abord abordé via la théorie du filtrage par un semi-groupe unitaire. Le cas d'un état stationnaire constant est traité dans [BC1, BC2, BC3, BC4]. Il s'agit ici d'étendre ces résultats au cas des états stationnaires non constants impliquant des géométries plus compliquées (plus à même de refléter les situations observées), par exemple prenant en compte ce qui se passe au voisinage d'un point de croisement des lignes de champ magnétique (reconnexion magnétique).

Context and Thesis Project (objectives, methods and expected results)

This thesis focuses on the mathematical analysis of the fourth state of matter: plasmas, which represent more than 99% of the visible matter in the universe. A still mysterious problem concerning it relates to the phenomenon of « magnetic reconnection », through which magnetic energy can be converted into kinetic and thermal energy. Magnetic reconnection (particularly the so-called « fast » or « non collisional » reconnection) is identified as the process responsible for sawtooth oscillations (cf. « sawtooth instabilities/crashes ») that can lead to heat and/or particles loss, or even disruption phenomena, in magnetic confinement fusion plasmas such as those in Tokamaks (e.g., ITER) or Stellarators (e.g., Wendelstein 7-X). This results in a degradation or even a loss of confinement, which limits or stops fusion reaction. It is worth noting that magnetic confinement fusion is considered as a new, clean (zero carbon emissions, no radioactive waste unlike thermonuclear fission), and abundant energy source, potentially accessible in the coming decades. These same violent disruption phenomena are also observed in space and astrophysical plasmas, such as solar flares.

Some aspects of magnetic reconnection can be explored by studying incompressible limits. This involves identifying the long-time asymptotic behavior (in $1/\varepsilon$, with $0 < \varepsilon \ll 1$) of a dynamical system (the Euler-Maxwell two-fluid system) under the effect of small perturbations (of amplitude ε) of a fixed stationary state. This singular limit problem can initially be addressed by the unitary semigroup filtering method. The case of a constant stationary state is treated in [BC1, BC2, BC3, BC4]. Here, the aim is to extend these results to the case of non-constant stationary states involving more complex geometries (more likely to reflect observed situations), for example by taking into account what happens in the vicinity of a crossing point of the magnetic field lines (magnetic reconnection).

Informations complémentaires sur l'encadrement de la thèse

Cette thèse sera encadrée à 50% par Nicolas Besse (Professeur, Laboratoire J.-L. LAGRANGE, Observatoire de la Côte d'Azur, Nice) et à 50% par Christophe Cheverry (Professeur, IRMAR, Université de Rennes, Rennes). La thèse sera réalisée dans l'équipe Turbulence des Fluides et Plasmas (FPT) du laboratoire J.-L. LAGRANGE de l'Observatoire de la Côte d'Azur (OCA) à Nice. Une collaboration avec le professeur Dr. Slim Ibrahim de l'université Victoria (Canada) est envisagée.

Further informations on the supervision of the PhD thesis

This PhD thesis will be supervised at 50% by Nicolas Besse (Full Professor, Laboratory J.-L. LAGRANGE, Observatoire de la Côte d'Azur, Nice) and at 50% by Christophe Cheverry (Full Professor, IRMAR, Université de Rennes, Rennes). The PhD thesis will be carried out in the Fluid and Plasma Turbulence (FPT) team of the J.-L. LAGRANGE laboratory at Observatoire de la Côte d'Azur (OCA) in Nice. A collaboration with Professor Dr. Slim Ibrahim from Victoria University (Canada) is being considered.

Profil, connaissances et compétences requises

Le candidat doit posséder de solides connaissances en analyse des EDP, analyse asymptotique et analyse fonctionnelle. Une connaissance approfondie des méthodes mathématiques pour les équations de mécanique des fluides (équations d'Euler et Navier-Stokes, magnétohydrodynamique, systèmes hyperboliques de lois de conservation, équations de Maxwell, ...) serait un grand avantage. Certaines notions de physique des plasmas seraient appréciées mais pourront être acquises tout au long de la thèse.

Prerequisites, skills and profile

The applicant should possess a strong knowledge of PDEs analysis, asymptotic analysis and functional analysis. In-depth knowledge of mathematical methods for fluid mechanics equations (Euler and Navier-Stokes equations, magnetohydrodynamics, hyperbolic systems of conservation laws, Maxwell equations, ...) would be a great advantage. Some notions of plasma physics would be appreciated but can be acquired along the PhD thesis.

Bibliographie/Bibliography

[BC1] N. Besse, C. Cheverry, « The equations of extended magnetohydrodynamics » SIAM J. Math Anal. 57 (2025) 4519-4555.

[BC2] N. Besse, C. Cheverry, « Singular limits of anisotropic weak solutions to compressible magnetohydrodynamics », to appear in J. Math. Pures Appl. (2025); preprint arXiv: 2506.19784.

[BC3] N. Besse, C. Cheverry, « Asymptotic analysis of extended magnetohydrodynamics » submitted, preprint hal-05009504 (2025).

[BC4] N. Besse, C. Cheverry, « The incompressible limit of the Euler-Maxwell two-fluid system », submitted, preprint hal-05375556 (2025).