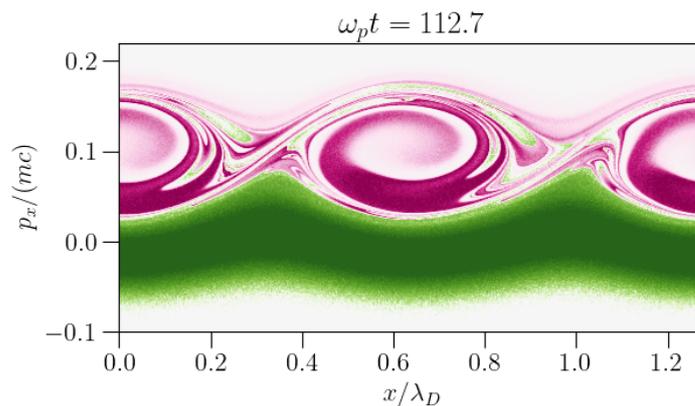


<b>Titre :</b> <b>Théorie cinétique des plasmas</b>
<b>Sigle :</b> TC3
<b>Coordinateur de l'UE :</b> Jean-Luc RAIMBAULT, Laboratoire de Physique des Plasmas (LPP)
<b>Equipe pédagogique :</b> Mickaël GRECH, Pierre MOREL, Jean-Luc RAIMBAULT
<b>Prérequis :</b> Masters M1 de Physique et Ecoles d'Ingénieurs.
<b>Crédits :</b> 3 ECTS
<b>Langue :</b> Français/Anglais



*Phase non linéaire de l'instabilité « bump-in-tail »  
(vert : plasma, rose : faisceau)*

**Ce cours se divise en trois parties présentées ci-dessous.**

## **I. Théorie Cinétique : les fondements**

**Mots-clefs :** Espace des phases, densité de probabilité, fonction de distribution; Equations cinétiques (Liouville, Klimontovich, Boltzmann, Vlasov), Hiérarchie BBGKY, Moments hydrodynamiques; Modèles de Vlasov-Poisson & Vlasov-Maxwell, Lois de conservation, Théorie linéaire (ondes et instabilités), Interaction onde-particule, Amortissement Landau, Collisions Coulombiennes, Opérateurs de collision, Fréquences de collisions, Coefficients de diffusion, Conductivité, Chauffage et transport de la chaleur.

Ce cours a pour objectif de présenter les bases de la théorie cinétique des plasmas. Il se limite aux plasmas classiques, non relativistes et totalement ionisés.

Une première partie introductive présente les notions d'espaces des phases, densités de probabilité et fonctions de distribution, ainsi que les équations de Klimontovich et Liouville qui décrivent l'évolution de ces dernières. Sont également présentées les hypothèses et procédures permettant de passer de ces descriptions exactes aux descriptions statistiques très largement utilisées pour la description cinétique des plasmas: l'équation cinétique des plasmas avec prise en compte des collisions, et l'équation de Vlasov pour les plasmas non collisionnels. Cette première partie s'achève en faisant le lien entre les descriptions cinétique et hydrodynamique.

La seconde partie du cours se concentre sur les plasmas non-collisionnels décrits par les systèmes de Vlasov-Poisson (électrostatique) et Vlasov-Maxwell (électromagnétique). Les propriétés générales de ces systèmes sont discutées: description des conditions d'équilibre,

conservation de l'entropie, de la quantité de mouvement et de l'énergie, etc. La linéarisation de ces systèmes est ensuite introduite et permet d'aborder les effets cinétiques importants pour l'étude des ondes et des instabilités. Notamment, l'amortissement Landau des ondes électrostatiques est amplement discuté dans le cadre de la théorie linéaire (relation de dispersion et taux d'amortissement) et les effets non-linéaires (piégeage de particule) sont rapidement abordés.

La troisième et dernière partie du cours est consacrée à l'étude des plasmas collisionnels. Seules seront considérées les collisions Coulombiennes élastiques. Les notions de section efficace, libre parcours moyen, fréquence de collisions et coefficients de diffusion seront introduites. La modélisation cinétique des collisions est ensuite discutée via différents opérateurs de collisions (Boltzmann, Fokker-Planck, Landau entre autres). L'utilité de ces opérateurs est enfin illustrée par l'étude de différents processus importants comme la conductivité électronique ou le transport de la chaleur.

## **II. Application aux plasmas de fusion magnétique : Relaxation et transport dans les plasmas de tokamak**

**Mots-Clefs :** Principes physiques de la fusion et du confinement magnétique – Équilibre magnétique – Théorie gyrocinétique – Opérateur de collision de Landau – Théorie néoclassique – Relaxations collisionnelle et non collisionnelle – Micro-instabilités – Résonances et variables action-angle – Écoulement zonaux et modes acoustiques géodésiques.

L'objectif est d'étudier les phénomènes de réorganisation de la fonction de distribution des particules du plasma, soumise par exemple à un chauffage, dans l'espace des vitesses (relaxation) ou dans l'espace des positions (transport). Plus particulièrement, les plasmas chauds, peu collisionnels et surtout complètement ionisés, sont étudiés. De tels plasmas se rencontrent en fusion thermonucléaire, mais aussi dans l'univers.

Après avoir introduit les principes de base d'un réacteur à fusion thermonucléaire, le cas du confinement magnétique est approfondi. La présence d'un fort champ magnétique permet de bâtir la théorie gyrocinétique, puis les équations fluides par dérivation. Les micro-instabilités principales, associées aux plasma magnétisés, peuvent ensuite être étudiées dans le cadre gyrocinétique.

L'opérateur de collision de Landau est présenté, pour en déduire les conséquences en termes de transport de particules et de chaleur dans le cadre de la théorie néoclassique. En présence de sources de particules ou de chaleur, ou encore d'instabilités, les mécanismes de relaxation de la fonction de distribution sont présentés, dans un formalisme action-angle. Le développement de structures à grande échelle, leur intérêt pour le confinement et leur persistance dans le temps sont finalement abordés.

## **III. Application aux plasmas froids : Relaxation et transport dans les plasmas faiblement ionisés**

**Mots-clefs :** Approximation à 2 termes et développement en harmoniques sphériques. Opérateur de collisions de Boltzmann. Modèles de Lorentz parfait et imparfait. Coefficients de transports électroniques. Equation de l'EEDF (Electron Energy Distribution Function).

Dans la plupart des plasmas froids, l'essentiel de la puissance électrique est absorbé par les électrons qui dissipent cette énergie par collisions élastiques et inélastiques avec les neutres. Du fait des faibles taux d'ionisation observés dans les plasmas froids, les collisions électrons-électrons sont rares et il en résulte généralement que la fonction de distribution des électrons

s'écarte significativement d'une distribution d'équilibre maxwellienne. Ce caractère hors-équilibre des électrons est la raison principale motivant une description cinétique du chauffage et du transport des électrons au sein des plasmas froids étudiés dans ce cours.

Les collisions dominantes pour les électrons dans les plasmas froids étant des collisions électrons-neutres, la fonction de distribution des électrons est quasi-isotrope, d'où l'introduction d'un développement en harmoniques sphériques de la fonction de distribution électronique qui conduit à l'approximation dite à 2 termes.

On étudie ensuite les collisions élastiques et inélastiques électrons-neutre en détail en utilisant l'opérateur de collisions de Boltzmann. Le faible rapport de masse  $m/M$  nous permet de simplifier cet opérateur dans le cadre des modèles dits de Lorentz. Des expressions explicites des termes de collisions, dans les cadres cinétique ou fluide, sont obtenues.

On utilise ensuite l'approche cinétique développée dans le cadre de l'approximation à 2 termes pour obtenir des expressions générales des coefficients de transport des électrons dans des plasmas faiblement ionisés, magnétisés ou pas, dans des situations stationnaires ou dépendant du temps. En particulier, les expressions explicites des coefficients de mobilité, de diffusion et de diffusion thermique, ainsi que leur analogue en énergie, sont obtenues.

Enfin, on établit l'expression générale de l'équation d'évolution de la partie isotrope de la fonction de distribution des électrons (EEDF) dans l'espace des phases position-énergie. A partir de cette équation, nous discutons 2 approximations, valables respectivement à hautes et basses pressions, les approximations dites locales et non-locales de l'EEDF. Des solutions explicites de l'équation de l'EEDF sous ces 2 approximations sont données dans le cas de collisions élastiques électrons-neutres dominantes, qui conduisent à la fonction de distribution de Druyvesteyn en champ local et aux relations de Boltzmann généralisées dans le cas de l'approximation non locale.