

Titre : Fusion magnétique : Turbulence, transport, chauffage, et confinement

Sigle : O1

Coordinateur de l'UE : Maxime LESUR, Institut Jean Lamour, Nancy

Equipe pédagogique : Maxime LESUR, Yves PEYSSON, Marie-Christine FIRPO

Prérequis : Masters M1 de Physique et Ecoles d'Ingénieurs, TC3 du M2 PPF.

Crédits : 3 ECTS

Langue : Français/Anglais

Mots-clés : Trajectoires des particules en champ magnétique intense – Dérives particulaires & fluides – Théorie quasi-linéaire – Ondes – Instabilités – Turbulence – Chauffage – Génération de courant.

L'objectif de ce module est d'étudier de manière étendue les processus en œuvre dans le cœur d'un plasma de fusion magnétique, avec un accent sur la turbulence, le transport anormal, le chauffage et la génération de courant, et l'état actuel de la recherche. On pourra ainsi aboutir à une compréhension globale des problématiques de confinement du plasma thermique, des impuretés, et des particules énergétiques (introduites par chauffage type NBI, et produites par les réactions de fusion).

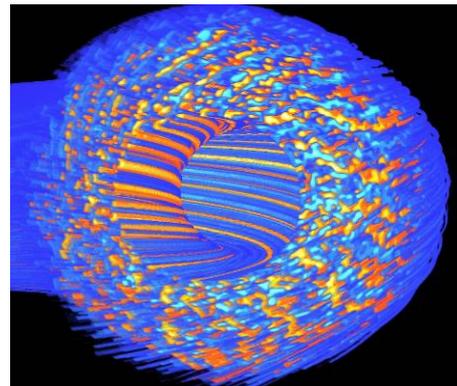
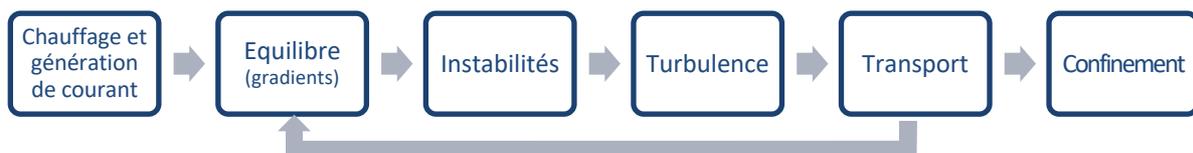


Illustration de la turbulence dans le cœur d'un tokamak : carte instantanée des fluctuations du potentiel électrique. Simulation gyrocinétique (code GYSELA)

Applications visées :

- prédiction du transport dans les tokamaks et stellarators modernes, et les prochaines expériences en présence de combustible (« burning plasma »).
- méthodes de contrôle, atténuation et canalisation de la turbulence.
- conception de scénarios pour mitiger l'éjection de particules énergétiques (dans ITER par exemple).
- conception de futurs réacteurs commerciaux (la taille et le coût d'un réacteur dépend très largement du coefficient de diffusion turbulente).



Ce module comprend trois parties connexes :

1. Turbulence, transport et confinement
2. Chauffage et génération de courant
3. Image réduite du confinement : le point de vue magnétique

Contenu de la partie « Turbulence, transport et confinement »

1. Formalisme angles-actions, application aux trajectoires de particules dans un tokamak
2. Principales instabilités dans les plasmas magnétisés
+ TD1 : effets cinétiques de l'instabilité ITG (Ion Temperature Gradient).
3. Diffusion, marche aléatoire, théorie quasi-linéaire (approches fluide et cinétique)
+ TD2 : étude quasi-linéaire du transport induit par l'ITG.
4. Turbulence : formation et propriétés – couplages non-linéaires, cascades d'énergie.
5. Transport et confinement dans les tokamaks
+ TD3 : transport d'impuretés
+ TD4 : temps de confinement
6. Particules rapides - instabilités, transport et pertes.

Contenu de la partie « Chauffage et génération de courant »

Le cours porte d'abord sur une introduction générale montrant que, pour atteindre le régime thermonucléaire, des chauffages additionnels sont nécessaires et que le chauffage Ohmique est insuffisant. On discute aussi pourquoi des méthodes externes sont nécessaires pour entretenir de manière continue un plasma magnétisé dans un tokamak. Les méthodes de chauffage et de génération de courant peuvent être séparées en deux catégories : celles utilisant les particules (injection de neutres rapides) et celles basées sur les ondes radiofréquence. On aborde les principes généraux pour chacune d'elles, sur la base d'une description cinétique du plasma. Pour les ondes radiofréquence, on se concentre sur les trois principales méthodes, l'onde cyclotronique ionique, celle à la fréquence hybride basse et enfin celle à la fréquence cyclotronique électronique. On décrit les conditions d'application de l'optique géométrique et la méthode du tracé de rayons pour calculer le champ électrique qui accélère de manière résonante les électrons. On aborde l'interaction quasi-linéaire dans le cadre de calculs cinétiques pour estimer la puissance absorbée par le plasma. Enfin, on évoque les effets néoclassiques et le courant de bootstrap sur lequel reposent de grands espoirs pour réaliser un réacteur de fusion auto-entretenu.

Contenu de la partie « Image réduite du confinement : le point de vue magnétique »

On présente un aperçu des conséquences de la propriété de divergence nulle du champ magnétique. On montre qu'à tout instant les lignes de champ magnétique peuvent être vues comme des trajectoires d'un système hamiltonien à 1.5 degrés de liberté. On introduit les notions d'application de Poincaré, de mappings, puis on discute le rôle et l'importance du chaos des lignes de champ magnétique dans les tokamaks à travers les exemples des barrières de transport et des dents de scie dans les tokamaks. Le rôle joué par le facteur de sécurité et la notion de résonance sont particulièrement mis en avant.