

# Master 1 Internship

**Laboratoire :** Centre de Physique Théorique, UMR 7332

**Adresse :** CPT, Campus de Luminy, Case 907, 163 Avenue de Luminy 13288 Marseille Cedex 9, France

**Encadrants :** Aurélien Cordonnier et Xavier Leoncini

**Courriel :** aurelien.cordonnier@cpt.univ-mrs.fr et xavier.leoncini@cpt.univ-mrs.fr

**Titre :** Étude du transport chaotique de particules chargées dans des configurations de champ magnétique idéales.

**Title :** Study of the chaotic transport of charged particles evolving in idealized magnetic fields.

Au cours des dernières années, il a été démontré que l'impact du chaos de basse dimension dans le mouvement des particules chargées d'un plasma dans des configurations magnétiques idéales est capable de détruire des quasi-invariants dans certaines régions de l'espace des phases. En particulier, l'existence d'une constante adiabatique, à savoir le moment magnétique  $\mu$ , qui est au cœur de la réduction gyrocinétique, est apparue comme douteuse dans ces régions. Lorsqu'elles existent, il a été démontré que cela n'impliquait pas l'intégrabilité de la dynamique, même dans des champs magnétiques axisymétriques [1–3]. Il est donc apparu utile de calculer les solutions exactes de l'équation de Vlasov à l'équilibre [4–7]. Étonnamment, ces solutions peuvent présenter une bifurcation d'un plasma bien confiné avec de forts gradients de densité à un plasma moins confiné. Cela rappelle la transition L-H observée dans les dispositifs de fusion, et est censé être lié à la présence d'une barrière de transport [2]. Dans le cas présent, les différents profils semblent émerger selon qu'il existe ou non des points instables avec une séparatrice associée dans la dynamique hamiltonienne microscopique des particules. Au cours de ce stage, l'étudiant se familiarisera avec les problèmes et explorera les solutions plus en détails. Il s'agira entre autres de caractériser les liens entre les contraintes d'optimisation du problème, d'un point de vue théorique, et, d'étudier la stabilité des solutions par le biais de simulations. Un des enjeux est de pouvoir analyser le transport des particules à partir du comportement chaotique hamiltonien des trajectoires microscopiques. Un autre défi consiste à extraire des sections de Poincaré et à mettre en évidence la destruction du quasi-invariant  $\mu$ .

---

## ENGLISH VERSION

In the last few years, the impact of low dimensional chaos in the motion of charged particles in ideal plasma configurations has been shown to be able to destroy quasi-invariants in some regions of the phase space. Most notably the existence of an adiabatic constant, namely the magnetic moment  $\mu$ , which is at the heart of the gyrokinetics reduction appeared to be questionable in these regions, or when it exists, this was shown not to imply the integrability of the dynamics, even in axisymmetric magnetic fields [1–3]. It appeared therefore useful to compute exact equilibrium solutions of the Vlasov equation [4–7]. Surprisingly these solutions can display a bifurcation from a plasma that is well confined with steep density gradients to one that is less confined. This is reminiscent of the so called L-H transition observed in fusion machine, and is supposedly linked to the presence of a transport barrier [2]. In the present case, the different profiles appear to emerge depending on whether or not unstable points with an associated separatrix exist in the microscopic Hamiltonian dynamics of the particles. During this internship the student will familiarize himself with the problems, and explore some of the solutions in more detail. Among other things, it will be a question of characterizing the links between the constraints of optimization of the problem from a theoretical point of view and of studying the stability of the solutions through simulations. One of the issue is being able to analyze the transport of particles starting from the Hamiltonian chaotic behavior of the microscopic trajectories. Another challenge is to extract Poincaré sections and to highlight the destruction of the quasi-invariant  $\mu$ .

**Scientific Environment:** This internship work will be part of a long standing collaboration of the CPT with the IRFM of the CEA Cadarache within the French national research federation of magnetic confinement fusion (FR-FCM) and the TOP project from the A\*MIDEX initiative. Good knowledge of dynamical systems and classical statistical physics will be a plus, mixing both numerical and analytical work will be expected from the interested candidate.

- 
- [1] Benjamin Cambon, Xavier Leoncini, Michel Vittot, Rémi Dumont, and Xavier Garbet. Chaotic motion of charged particles in toroidal magnetic configurations. 24(3):033101. URL: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4885103>, \path{doi:10.1063/1.4885103}.
  - [2] Shun Ogawa, Xavier Leoncini, Guilhem Dif-Pradalier, and Xavier Garbet. Study on creation and destruction of transport barriers via effective safety factors for energetic particles. 23(12):122510. URL: <http://arxiv.org/abs/1610.02867>, \path{arXiv:1610.02867}, \path{doi:10.1063/1.4972092}.
  - [3] Shun Ogawa, Benjamin Cambon, Xavier Leoncini, Michel Vittot, Diego del Castillo-Negrete, Guilhem Dif-Pradalier, and Xavier Garbet. Full particle orbit effects in regular and stochastic magnetic fields. 23(7):072506. URL: <http://arxiv.org/abs/1604.05112>, \path{arXiv:1604.05112}, \path{doi:10.1063/1.4958653}.
  - [4] Shun Ogawa, Xavier Leoncini, Alexei Vasiliev, and Xavier Garbet. Tailoring steep density profile with unstable points. 383(1):35–39. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375960118309587>, \path{doi:10.1016/j.physleta.2018.09.014}.
  - [5] Elias Laribi. Solutions stationnaires de vlasov-maxwell en geometrie cylindrique, (master's thesis).
  - [6] Elias Laribi, Shun Ogawa, Guilhem Dif-Pradalier, Alexei Vasiliev, Xavier Garbet, and Xavier Leoncini. Influence of toroidal flow on stationary density of collisionless plasmas. 4(3):172. URL: <https://www.mdpi.com/2311-5521/4/3/172>, \path{doi:10.3390/fluids4030172}.
  - [7] Aurélien Cordonnier. Chaotic motion of charged particles in magnetic fields, from single trajectories to collective equilibrium: applications to fusion plasmas, (master's thesis).