

TD N°11 2021 – 2022 – ANNEXE EXERCICE 3

Fusion dans les étoiles... fusion sur Terre

Dans le Soleil et les étoiles, les conditions nécessaires à la fusion en termes de température, densité et temps de confinement sont maintenues grâce à la gravité, solution qu'il est impossible d'utiliser sur Terre. La pression exercée par la gravitation peut y être remplacée par la pression exercée par des champs magnétiques intenses.

Des boîtes magnétiques pour contenir le plasma

Le plasma est un fluide électriquement conducteur, mais neutre globalement, et dans lequel les **ions** et les électrons se meuvent presque indépendamment les uns des autres. Plongés dans un champ magnétique, ils vont suivre des trajectoires en forme d'hélices qui s'enroulent autour des lignes de champ et y restent "piégés". C'est le principe du confinement magnétique.

Les géométries droites (ou cylindriques) d'abord étudiées présentent l'inconvénient de laisser échapper le plasma aux extrémités. Pour éviter cela, le cylindre est refermé sur lui-même afin d'obtenir une configuration torique. Cependant, dans une telle configuration, la courbure (et donc la force centrifuge) et l'inhomogénéité du champ magnétique (plus élevé sur la face intérieure du tore que sur la face extérieure) sont la cause d'une dérive des particules chargées. Ions et électrons ont tendance à se séparer, les uns vers le haut et les autres vers le bas, et ils finissent par sortir du piège magnétique. Pour compenser cet effet de dérive, les lignes de champ sont rendues hélicoïdales (figure 1). Les particules passent alors successivement en haut puis en bas de la configuration magnétique : l'effet de dérive, qui est toujours dans le même sens, est alors en moyenne compensé. Ceci est réalisé en ajoutant au champ torique (dit "toroïdal") initial un autre champ magnétique qui lui est perpendiculaire (le champ "poloïdal"). Dans un "**tokamak**", machine de conception russe, le champ magnétique poloïdal est créé par un courant axial circulant dans le plasma lui-même, qui devient le secondaire d'un transformateur (les plasmas ainsi créés sont dits "*inductifs*"). Le tokamak est donc au départ un dispositif *impulsionnel*. Il peut devenir continu en générant le courant axial de façon "*non inductive*" par des ondes ou des faisceaux de particules qui transfèrent leur impulsion aux électrons du plasma. Dans un "**stellarator**", la configuration magnétique repose entièrement sur des courants circulant dans des bobines externes. Cette configu-

ration, naturellement continue mais plus complexe sur le plan des principes et de la géométrie, n'est pas au même niveau de développement que la configuration tokamak. Ses qualités intrinsèques motivent toutefois la poursuite des efforts dans ce domaine.

Le plasma se comporte comme un gaz et exerce vers l'extérieur une pression (cinétique) dont la valeur augmente avec la température et la densité. Si l'on veut confiner le plasma, cette pression doit être équilibrée par une pression vers l'intérieur. C'est le rôle de la pression (magnétique) exercée par le champ magnétique. Dans la pratique, on montre que pour éviter l'apparition d'instabilités hydrodynamiques, la pression cinétique doit être très inférieure (d'un facteur 10) à la pression magnétique. On voit donc ici apparaître une limite sur la densité. Avec des valeurs usuelles pour la température (10-20 keV) et le champ magnétique (5-10 teslas), cette densité limite est de l'ordre de 10^{20} m^{-3} . Ceci fixe aussi la valeur du temps de confinement que doit viser la fusion magnétique: de l'ordre de quelques secondes (critère de Lawson).

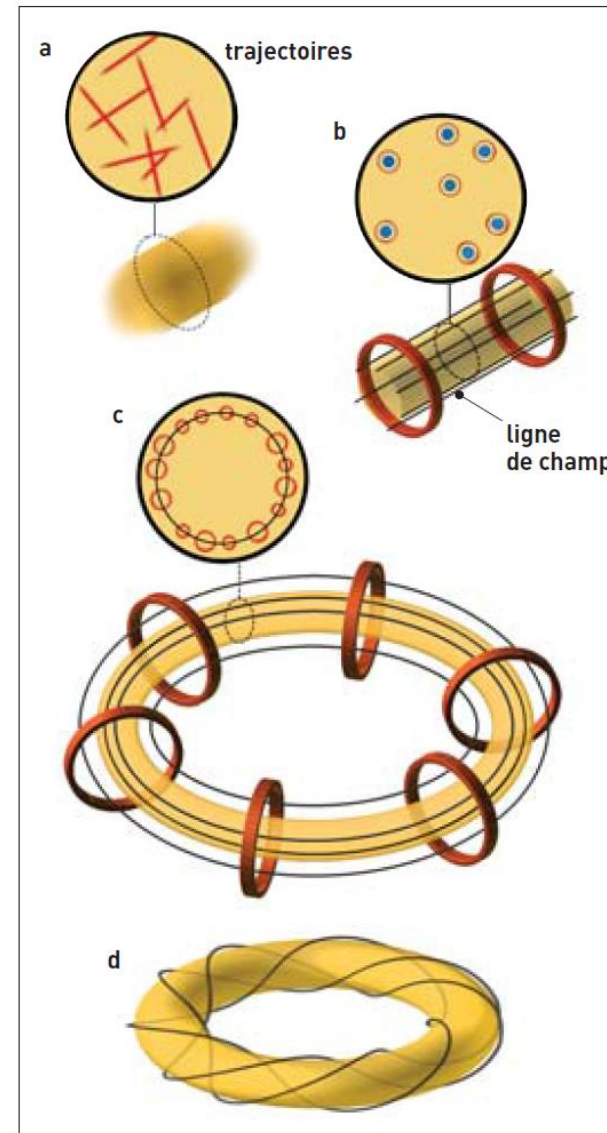


Figure 1. Principe du confinement magnétique. Dans un plasma à l'état libre (a), les particules ont une trajectoire aléatoire et vont s'échapper. Si ce plasma baigne dans un champ magnétique rectiligne (b), les particules s'enroulent autour des lignes de champ et ne peuvent plus atteindre les parois latérales. Afin d'éviter les pertes aux extrémités, la boîte est refermée en tore (c). Pour minimiser encore les fuites de particules, les lignes de champ doivent être hélicoïdales (d).

