

Barrières de transport dans les plasmas : des tokamaks aux étoiles

Y. Sarazin¹, A. Strugarek², D. Zarzoso³, J. Abiteboul³, P. Beyer⁴, S. Brun⁵, L. Chôné^{1,4},
G. Dif-Pradalier¹, X. Garbet¹, Ph. Ghendrih¹, V. Grandgirard¹, J.P. Zahn⁵

¹ CEA, IRFM, F-13108 Saint-Paul-lez-Durance, France

² Département de Physique, Université de Montréal, H3C 3J7 Montréal, Canada

³ Max-Planck Institut für Plasmaphysik, 85748 Garching-bei-München, Germany

⁴ Aix-Marseille Université, CNRS, PIIM UMR 7345, 13397 Marseille Cedex 20, France

⁵ Laboratoire AIM Paris-Saclay, CEA/Irfu Université Paris-Diderot CNRS/INSU, F-91191
Gif-sur-Yvette, France

mél : yanick.sarazin@cea.fr

1 Introduction

Les plasmas chauds magnétisés sont souvent le siège d'instabilités microscopiques qui saturent non-linéairement en régime turbulent. Cette turbulence donne lieu à du transport de matière, de quantité de mouvement et de chaleur. Les plasmas cinétiques, dans lesquels l'énergie cinétique domine largement l'énergie potentielle (gravitationnelle ou de Coulomb), ont par ailleurs la propension à s'auto-organiser. Peuvent en particulier apparaître *spontanément* des barrières de transport, caractérisées par une réduction brutale et spatialement localisée du transport turbulent. Dans le cas où ce mécanisme de transport est dominant, il en résulte de fortes variations des profils moyens, c'est-à-dire à de forts gradients.

Des barrières de transport sont observées à la fois dans les plasmas naturels (e.g., intérieur du Soleil, interface vent stellaire/magnétosphère planétaire) et dans les plasmas de laboratoire (e.g., tokamaks). Elles sont généralement le fruit de l'interaction entre des écoulements cisailés à grande échelle – qu'ils soient auto-générés par la turbulence elle-même ou d'origine extérieure – et les fluctuations turbulentes à plus petite échelle. L'étude de leur dynamique et de leur stabilité est rendu difficile par la large gamme d'échelles spatiales et temporelles qu'elles impliquent.

Dans cet exposé, nous traiterons des propriétés de barrières de transport qui existent dans l'intérieur du Soleil d'une part, et dans les plasmas de tokamaks d'autre part. Nous tâchons de montrer les analogies physiques et présentons les avancées récentes dans la compréhension de ces mécanismes.

Le recours à des codes massivement parallèles a en particulier permis d'étudier avec succès, à l'aide de modélisations numériques "premiers principes", l'interaction entre les échelles turbulentes du système et l'évolution plus lente des profils moyens du plasma. Cette étude nous a conduit à discriminer différents modèles théoriques visant à expliquer la structure de la *tachocline* solaire, et à proposer un mécanisme nouveau pouvant être à l'origine de la relaxation quasi-périodique des barrières de transport observée expérimentalement dans les tokamaks. Pour finir, nous montrerons qu'un unique modèle réduit permet de capturer certains des éléments critiques de ces deux barrières de transport [1, 2].

2 Absence de confinement de la tachocline par un champ magnétique fossile ?

L'intérieur solaire est divisé en deux grandes régions. L'intérieur de l'étoile est fortement stratifié en profondeur. Dans cette zone stable où l'énergie est transportée par rayonnement (zone radiative), les grandeurs physiques évoluent sur des échelles de temps séculaires de l'étoile.

Le tiers extérieur (en rayon) du Soleil est quant à lui instable vis-à-vis de l'instabilité de type Rayleigh-Bénard. Dans cette zone convective turbulente, le transport de la chaleur est assuré par thermo-convection. L'héliosismologie a récemment mis en évidence que, si le cœur radiatif était animé d'une rotation solide, la zone convective avait une rotation différentielle : les pôles tournant plus lentement et l'équateur plus vite que l'intérieur [3, 4]. L'interface est caractérisée par une couche mince, la tachocline, qui occupe moins de 4% du rayon solaire. Elle possède un fort cisaillement de vitesse, à la fois dans les directions radiale et latitudinale. De fait, la tachocline joue un rôle de barrière de transport pour la redistribution du moment cinétique dans l'intérieur solaire. On pense aujourd'hui qu'elle joue également un rôle important dans l'organisation spatio-temporelle du champ magnétique du Soleil, que ce soient sa structure principalement dipolaire à grande échelle, ou les tâches et éruptions solaires.

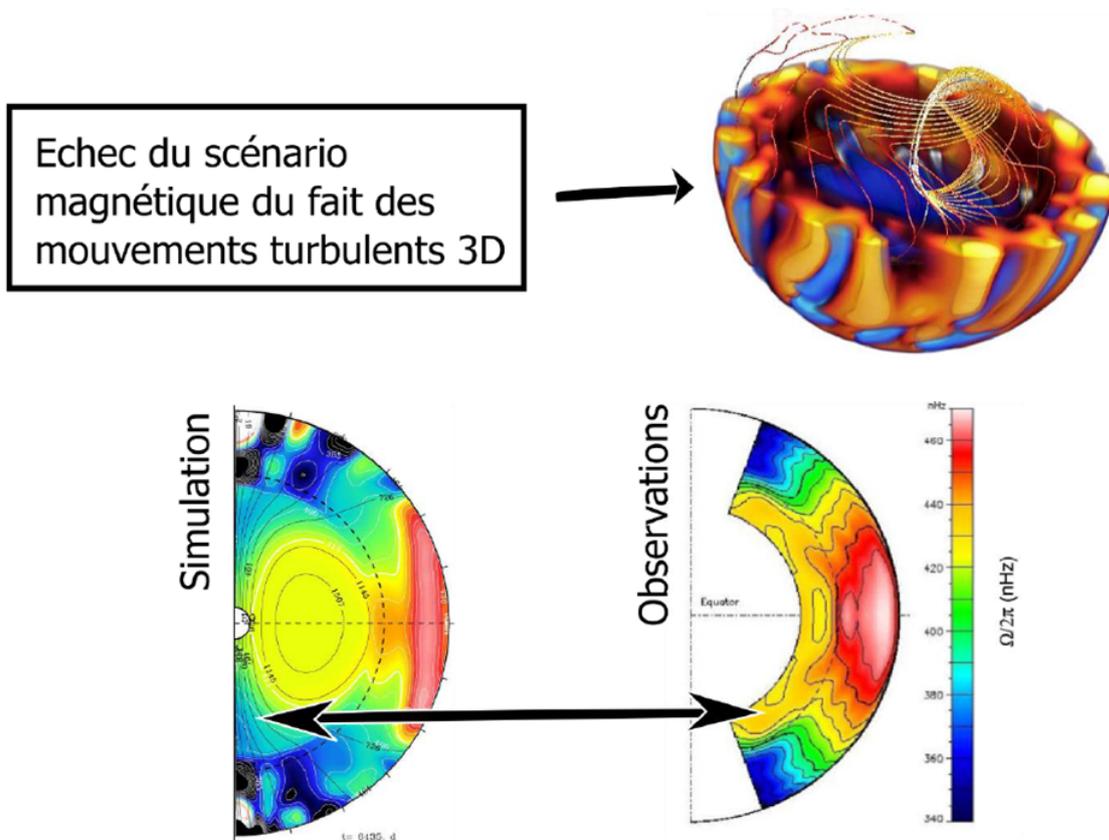


FIGURE 1 – Haut : carte 3D des fluctuations de température et quelques lignes du champ magnétique fossile en évolution (simulation ASH). Bas : coupes internes montrant la rotation azimutale dans la simulation (gauche) et mesurée expérimentalement (droite).

Une des questions clé consiste à comprendre l'existence même de cette tachocline, et en particulier sa faible épaisseur, les premiers modèles proposés prédisant qu'elle aurait dû diffuser vers la zone radiative sur un temps de vie solaire [5]. Le scénario dit de *confinement magnétique* fait appel à l'existence d'un champ magnétique de grande échelle confiné dans l'intérieur du Soleil, et qui pourrait éventuellement limiter l'épaisseur de la tachocline à la fine couche que nous observons [6]. A l'aide de simulations d'équations magnétohydrodynamiques (MHD) 3D réalisées avec le code ASH (Anelastic Spherical Harmonics), nous montrons qu'un tel champ magnétique reste très difficilement confiné dans l'intérieur solaire et devient au contraire un vecteur de transport de moment cinétique, brisant ainsi la barrière de transport qu'est la tachocline

[7, 1]. Ce résultat est en complet désaccord avec les observations à notre disposition. Nos travaux tendent ainsi à mettre en doute qu'un tel mécanisme puisse s'établir dans l'intérieur solaire et suggèrent d'autres scénarios alternatifs pour expliquer le fonctionnement de cette barrière de transport.

3 Une instabilité détruisant les barrières de transport dans les tokamaks

Les plasmas de tokamaks sont confinés au moyen de puissants champs magnétiques, toroïdaux et poloïdaux (les deux angles du tore), qui engendrent des surfaces magnétiques en forme de tores emboîtés. A l'équilibre, les particules sont contraintes de se mouvoir sur ces dernières. Collisions et turbulence viennent briser ce confinement idéal. En pratique, c'est à la turbulence que l'on doit l'essentiel des pertes énergétiques dans de telles machines. Dans ces conditions, tout moyen de contrôle de la turbulence apparaît plus que souhaitable.

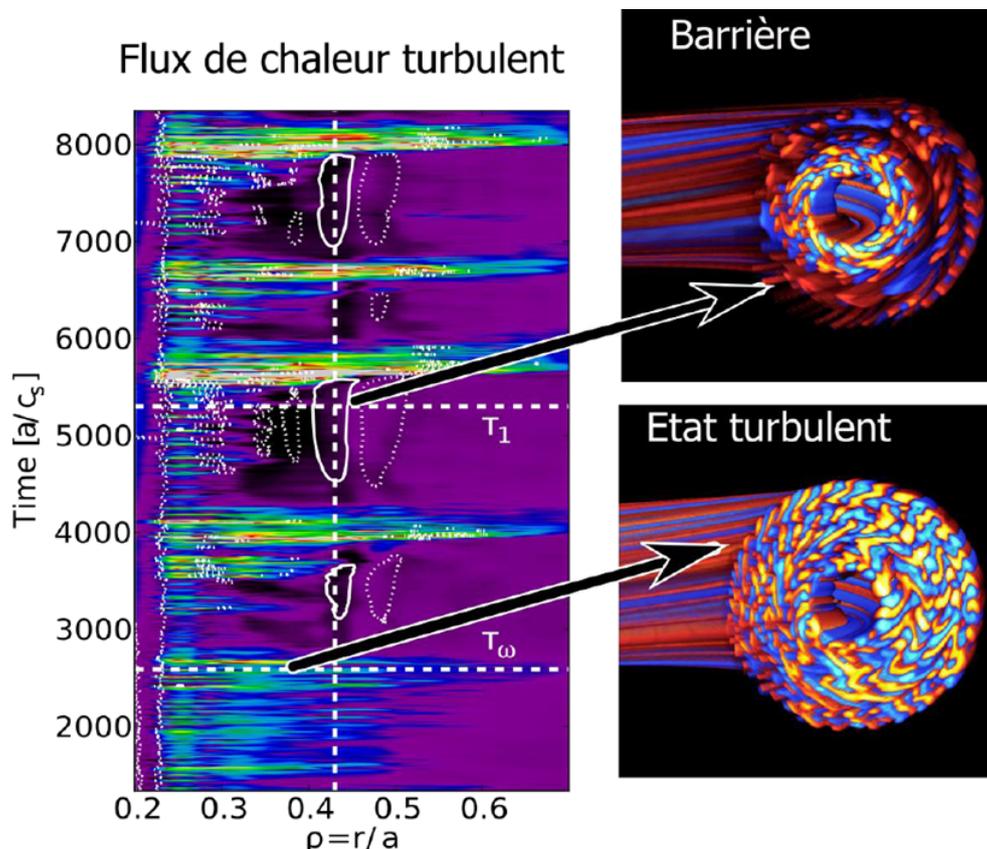


FIGURE 2 – Gauche : carte couleur du flux de chaleur turbulent. La ligne vertical en tirets repère la localisation de la polarisation. Droite : coupes poloïdales instantanées des fluctuations du potentiel électrique lorsque la barrière est présente (haut) et détruite (bas) (simulation GYSELA).

Or, de nombreuses observations expérimentales rapportent l'existence des barrières de transport pour l'énergie dans ces plasmas (see e.g. [8, 9]). Ces barrières sont d'une extrême importance car, en améliorant le confinement du plasma dans les tokamaks, elles augmentent de facto fortement la performance de la machine en terme de rendement énergétique. Les mécanismes physiques qui les contrôlent sont encore aujourd'hui un sujet actif de recherche. Un des mécanismes généralement admis fait jouer aux écoulements poloïdaux (dont on peut montrer qu'ils sont reliés au champ électrique radial) fortement cisailés un rôle clé [10]. En l'absence de sources externes, ces derniers sont pour partie auto-générés par la turbulence elle-même, par

un processus sans doute analogue à celui à l'origine des bandes azimutales dans l'atmosphère turbulente de Jupiter, et pour partie le résultat de l'équilibre des forces.

De telles barrières extrêmement difficiles à modéliser de façon auto-consistante. Pour la première fois, nous avons réussi dans un modèle premier principe à simuler les conditions expérimentales d'apparition d'une telle barrière, et à simuler une barrière en construction. Notre étude repose sur l'utilisation du code gyrocinétique GYSELA (GYrokinetic SEmi-LAgrangian), qui fait évoluer la fonction de distribution des ions dans un espace des phases à 5 dimensions. Une telle approche est rendue nécessaire par la très faible collisionnalité des plasmas de fusion par confinement magnétique, pour lesquels la description fluide tombe en défaut. Dans le régime électrostatique considéré, la cohérence est assurée par l'électroneutralité. La réponse électronique est par ailleurs supposée adiabatique. En polarisant localement le plasma, nous sommes parvenus à générer un écoulement poloidal suffisamment cisailé pour permettre l'apparition d'une barrière de transport. Nos résultats mettent par ailleurs en évidence l'existence d'une instabilité secondaire, qui est à l'origine de la destruction quasi-périodique de cette barrière de transport [11, 12]. Ce mécanisme, basé sur une forte anisotropie de température qui accompagne naturellement l'écoulement cisailé permettant la création de la barrière, pourrait expliquer la déstabilisation de barrières observée expérimentalement dans les tokamaks. Ce travail permet d'entrevoir une nouvelle façon de mieux contrôler les barrières de transport expérimentales, et ainsi d'améliorer les performances des futurs tokamaks.

Références

- [1] A Strugarek, "Turbulence, transport et confinement : des tokamaks au magnétisme des étoiles", thèse de doctorat, Université Paris-Diderot (2012)
- [2] L. Chôné, P. Beyer, Y Sarazin et al., "L-H transition dynamics in fluid turbulence simulations with neoclassical force balance", submitted to Phys. Plasmas (2014)
- [3] Schou, J., et al., "Helioseismic Studies of Differential Rotation in the Solar Envelope by the Solar Oscillations Investigation Using the Michelson Doppler Imager", ApJ, **505**, 390 (1998)
- [4] Thompson, M. J., J. Christensen-Dalsgaard, M. S. Miesch, and J. Toomre, "The Internal Rotation of the Sun", Annual Review of A&A, **41**, 599 (2003)
- [5] E. A. Spiegel, J.-P. Zahn, "The solar tachocline", Astronomy and Astrophysics, **265**, 106 (1992)
- [6] Gough, D. O., and M. E. McIntyre, "Inevitability of a magnetic field in the Sun's radiative interior", Nature **394**, 755 (1998)
- [7] A Strugarek, A.S. Brun, J.P. Zahn, "Magnetic confinement of the solar tachocline : II. Coupling to a convection zone", Astronomy and Astrophys. **534**, A32 (2011)
- [8] F. Wagner et al., "Regime of Improved Confinement and High Beta in Neutral-Beam-Heated Divertor Discharges of the ASDEX Tokamak", Phys. Rev. Lett. **49**, 1408 (1982)
- [9] Leblanc, B., et al., "Active core profile and transport modification by application of ion Bernstein wave power in the Princeton Beta Experiment-Modification", Phys. Plasmas, **2**, 741–751 (1995)
- [10] Terry, P. W., "Suppression of turbulence and transport by sheared flow", Reviews of Modern Physics, **72**, 109 (2000)
- [11] A Strugarek, Y Sarazin, D Zarzoso et al., "Unraveling quasi-periodic relaxations of transport barriers with gyrokinetic simulations", Phys. Rev. Lett. **111**, 145001 (2013)
- [12] A Strugarek, Y Sarazin, D Zarzoso et al., "Ion transport barriers triggered by plasma polarization in gyrokinetic simulations", Plasma Phys. Control. Fusion **55**, 074013 (2013)