

Magnétohydrodynamique dans un disque képlerien : instabilité magnétorotationnelle et saturation non linéaire

A. Ribeiro¹, C. Nore^{1,2}, J. Léorat³, & J.-L. Guermond⁴

¹ LIMSI-CNRS, BP133, 91403 Orsay Cedex, France

² Université Paris-Sud 11, 91405 Orsay cedex, France

³ LUTH, Observatoire de Paris-Meudon, 92195 Meudon, France

⁴ Department of Mathematics, Texas A&M University, 3368 Tamu, College Station, TX 77843-3368, USA

ribeiro@limsi.fr

Dans la plupart des objets astrophysiques, on observe des champs magnétiques au sein d'écoulements turbulents de fluides conducteurs. Quel est le rapport entre le champ de vitesse turbulent et le champ magnétique à grande échelle ? Ce dernier est-il le produit ou la cause de la turbulence hydrodynamique ? L'étude de ces questions nécessite une description des interactions non linéaires entre ces deux champs.

La détermination du champ magnétique à grande échelle demande de tenir compte de la géométrie des écoulements considérés. Dans le cas des disques astrophysiques (protostellaire, protoplanétaire, accrétion, galactique), les conditions magnétiques à l'interface avec le milieu extérieur isolant doivent être numériquement assurées, ce qui n'est simplement satisfait que pour la géométrie sphérique. Nous présentons des simulations de disque effectuées avec un code [1] éléments finis MHD (magnétohydrodynamique) en coordonnées cylindriques permettant d'imposer correctement ces conditions aux limites. Nous étudions l'évolution d'un disque d'axe Oz , de faible épaisseur ($R/L = 30$), contenant un écoulement azimuthal képlerien de fluide conducteur, sous l'action d'un champ magnétique extérieur uniforme H_0 parallèle à l'axe. Cette configuration initiale est choisie car c'est une solution stationnaire des équations MHD couplées. Elle peut se déstabiliser par instabilité magnétorotationnelle (MRI) suivant le choix des paramètres de contrôle, le nombre de Prandtl magnétique $Pm = Rm/Re = \nu/\eta$, le nombre de Reynolds Re et le nombre de Hartmann $Ha = \mu_0 H_0 L \sqrt{\sigma/\rho\nu}$ qui mesure l'intensité du champ appliqué (où μ_0 est la perméabilité magnétique du vide, σ la conductivité électrique, ρ la masse volumique, ν la viscosité cinématique et η la diffusivité magnétique). Nous nous bornons ici au cas $Pm = 1$. Nous nous intéressons d'abord au déclenchement de l'instabilité MRI, car cette phase peut se décrire avec des équations linéarisées dont les solutions permettent de valider les résultats numériques [2]. Pour un nombre de Reynolds donné, on vérifie qu'une perturbation initiale de la solution stationnaire est instable dans un intervalle d'intensité du champ magnétique appliqué. La croissance exponentielle des fluctuations avec un taux proche de la fréquence de rotation maximale entraîne l'apparition d'une force de Lorentz qui va modifier l'écoulement azimuthal initial en brisant la symétrie équatoriale, mettant ainsi fin à cette phase linéaire. Les caractéristiques temporelles et spatiales du régime de saturation non linéaire dépendent a priori des deux paramètres Re et Ha (en conservant $Pm = 1$). Pour des valeurs faibles du nombre de Reynolds ($Re = 280$, par exemple), après quelques oscillations de l'énergie des fluctuations, le système tend vers un point fixe. La suite de l'étude prévoit l'accroissement du nombre de Reynolds afin d'aborder des régimes dépendants du temps qui ont été observés dans certaines simulations. Une des questions principales qui est ainsi posée est l'apparition d'une turbulence MHD dans un réservoir fini, sans l'artifice de forces aléatoires, alors que l'écoulement képlerien initial est stable par rapport à des perturbations purement hydrodynamiques.

Références

1. J.-L. GUERMOND, R. LAGUERRE, J. LÉORAT ET C. NORE, An Interior Penalty Galerkin Method for the MHD equations in heterogeneous domains, *Journal of Computational Physics*, 2007, 221, p. 349-369.
2. L. L. KITCHATINOV AND M. V. MAZUR, On the global stability of rotating magnetized disks, *Astron. Astrophys.*, 1997, 324, p. 821-828. And S. A. BALBUS AND J. F. HAWLEY, Instability, turbulence, and enhanced transport in accretion disks, *Rev. Mod. Phys.*, 1998, 70, p. 1-53.