

Invariance d'échelle et propriétés statistiques de la turbulence

On pense que l'invariance d'échelle joue un rôle fondamental en turbulence. Les systèmes physiques réels ont une taille finie, et cela est susceptible d'induire des corrections à la symétrie d'échelle. B. Dubrulle a donc développé une théorie de l'invariance d'échelle dans les systèmes de taille finie. Cette théorie généralise le "finite size scaling" et permet de prédire le comportement de systèmes proches ou au delà de la transition critique. La théorie a été appliquée à la turbulence. Cela a permis d'expliquer certaines propriétés statistiques mystérieuses de la turbulence [Dubrulle, 2000], si l'on admet que les effets de taille finie sont engendrés par la présence d'une échelle de vitesse maximale. Cette découverte a des conséquences importantes sur les propriétés de la turbulence. Elle prouve par exemple que, contrairement à l'idée classique à la Kolmogorov-Richardson, le comportement "petite échelle" n'est pas dominé par un phénomène de cascade locale, avec des échelles de taille comparable, mais par des interactions avec l'écoulement à grande échelle. Dans [Laval et al, 1999,2001], nous avons exploré et confirmé numériquement ce scénario en 2 et 3 dimensions. Cela conduit à une nouvelle formulation de la dynamique petite échelle, à l'aide d'équation de type Langevin stochastique. D'un point de vue théorique, cette nouvelle formulation permet une compréhension qualitative complète des mécanismes de l'intermittence. D'un point de vue pratique, cela conduit à des nouveaux schémas numériques sous-mailles.

Modélisation de la turbulence

Dubrulle et Nazarenko, (1996) ont développé un nouveau modèle de turbulence basé sur une estimation des vitesses sous-mailles, plutôt que de leur corrélations, comme il est fait traditionnellement. Cette estimation se fait à l'aide d'une équation de Langevin, qui est couplée aux équations des grandes échelles, et qui est dérivée directement des équations de Navier-Stokes en utilisant l'hypothèse de non-localité. Dans cette équation, les interactions non-locales avec les grandes échelles sont prises en compte de façon exacte. Les autres interactions avec les échelles beaucoup plus petites sont paramétrisées par une viscosité turbulente, qui peut être calculée exactement en utilisant des méthodes du groupe de renormalisation. Cette méthode conduit ainsi à un modèle sans paramètre ajustable, qui peut être utilisé dans n'importe quel type d'écoulement (en rotation, stratifié avec ou sans champ magnétique). La méthode a été implémentée numériquement en turbulence 2D, et a conduit à une nouvelle méthode efficace de simulation grandes échelles, pouvant remplacer la méthode d'hyperviscosité [Laval, Dubrulle, Nazarenko 2000]. Ce modèle peut aussi servir à effectuer des simulations numériques directes accélérées par un facteur 100.

Application à la Géophysique et à l'Astrophysique

Le modèle Langevin peut être utilisé pour calculer analytiquement les profils d'équilibre dans des écoulements apparentés aux écoulements géophysiques, comme les écoulements de canaux ou de couche limite (Nazarenko, Kevlahan, Dubrulle, 1999; Dubrulle, Laval, Nazarenko, Kevlahan, 1999). En collaboration avec Peter Sullivan, nous avons utilisé le modèle pour calculer les profils moyens de vitesse et de température dans la couche limite atmosphérique (Dubrulle, Laval, Sullivan, 2000). Ces prédictions analytiques diffèrent des prédictions "classiques" mais sont en bon accord avec les résultats des campagnes de mesure. Plus généralement, B. Dubrulle a utilisé ce modèle pour calculer les lois d'échelle de la convection [Dubrulle, 2000, 2001]. Elle a montré que des effets de viscosité conduisent à des corrections logarithmiques des lois d'échelle classiques, corrections qui expliquent parfaitement le mystérieux régime de "forte turbulence". Le modèle a aussi été utilisé pour calculer

des viscosité et diffusivité turbulente en MHD bidimensionnelle. Un travail d'installation du modèle dans un GCM est en cours, ainsi que sa généralisation au calcul de réactions chimiques. Ces méthodes pourraient être appliquées à des simulations de turbulence dans les couches externes des étoiles. Une application à la formation du système solaire est décrit dans le paragraphe " Des Galaxies aux Planètes: Structuration de la matière dans l'Univers".