

GdR « Structure de la Turbulence et Mélange » et « Dynamo »

Compte rendu de la réunion à Nice du 6 au 9 novembre 2006

THEME 6 « TRANSPORT TURBULENT »

Méthodes lagrangiennes en théorie du transport turbulent

Dario Vincenzi

Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation, Göttingen (Allemagne)

Le problème du transport turbulent comprend une grande variété de phénomènes physiques très différents. Le transport de la température, la dispersion d'un polluant, la condensation dans les nuages, l'effet dynamo n'en sont que des exemples. Dans le cas passif, c'est-à-dire lorsqu'on néglige l'influence de la quantité transportée sur l'écoulement porteur, les équations du transport sont linéaires. L'approche lagrangienne permet alors de décrire une telle variété de phénomènes physiques à l'aide d'un même formalisme [Falkovich, Gawedzki & Vergassola, *Rev. Mod. Phys.* **73**, 913 (2001)]. L'objet central de la théorie est la distribution de probabilité des positions relatives des particules fluides. Dans le modèle de Kraichnan [Kraichnan, *Phys. Fluids* **11**, 945 (1968)], cette distribution satisfait une équation de diffusion « généralisée » avec coefficient de diffusion qui croît avec la distance entre couples de particules. Une fonction homogène quelconque de la taille du nuage de particules croît donc en temps de manière superdiffusive en accord avec les prédictions dimensionnelles. Une déviation du comportement dimensionnel est représentée par les fonctions des positions des particules qui annulent l'opérateur de diffusion généralisé mentionné ci-dessus. Ces fonctions sont dites *modes zéro*. Les modes zéro sont des fonctions spéciales à la fois de la taille et de la forme du nuage, et telles que leurs moyennes le long des trajectoires lagrangiennes restent constantes en temps. Ces quantités statistiquement conservées dans l'écoulement sont responsables des propriétés d'échelle anormales des fonctions de structure d'un champ scalaire transporté par un écoulement turbulent. Ce dernier résultat a été prouvé de façon rigoureuse pour le modèle de Kraichnan [Shraiman & Siggia, *C. R. Acad. Sci. Paris Sér. II* **321**, 279 (1995) ; Gawedzki & Kupiainen, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 3834 (1995) ; Chertkov et al., *Phys. Rev. E* **52**, 4924 (1995) ; Bernard, Gawedzki & Kupiainen, *J. Stat. Phys.* **90**, 519 (1998) ; Frisch, Mazzino & Vergassola, *Phys. Rev. Lett.* **80**, 5532 (1998)] et a été vérifié numériquement pour un écoulement de Navier-Stokes bidimensionnel [Celani et Vergassola, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 424 (2001)] et pour des modèles en couche [Arad et al., *Phys. Rev. Lett.* **87**, 164502 (2001)].

L'existence de modes zéro a aussi été démontrée dans le cadre du modèle de Kraichnan-Kazantsev pour le transport du champ magnétique. Cela permet d'obtenir une interprétation lagrangienne de l'effet dynamo cinématique. La croissance temporelle du champ magnétique est liée à l'évolution des vecteurs appartenant à l'espace tangent le long des trajectoires des particules fluides. En présence d'effet dynamo, les corrélations entre vecteurs tangents croissent exponentiellement en temps, tandis qu'en l'absence d'effet dynamo, elle décroissent en loi de puissance.

A. Celani, A. Mazzino & D. Vincenzi, « Magnetic field transport and kinematic dynamo effect : a Lagrangian interpretation », *Proc. R. Soc. A* **462**, 137 (2006).

Clustering of inertial particles and acceleration stagnation points in inertial range turbulence

Christos Vassilicos

Imperial College, Londres (Grande-Bretagne)

The clustering of small inertial particles or droplets in high Reynolds number inertial range turbulence *cannot* be explained without taking into account the multi-scale clustering of zero-acceleration points and the random sweeping of the turbulence whereby the acceleration field is predominantly advected by the velocity field. This sweeping is an essential and cornerstone *dominant order* ingredient of inertial range turbulence which is not taken into account in models such as the Kraichnan model or in models of inertial particle clustering which assume or imply that all the clustering effectively happens below the Kolmogorov scale. The clustering of zero-acceleration points is multiscale throughout the inertial range and the new concept of *stickiness* of zero-acceleration points is required to explain the multiscale inertial range clustering which also occurs over the entire inertial range of Stokes numbers. Unlike previously thought, the clustering of inertial particles cannot be explained in inertial range turbulence in terms of high bare vorticity and strain-rate regions nor in terms of chaotic attractors caused by the dissipative nature of Stokes drag.

L. Chen, S. Goto & J. C. Vassilicos, « Turbulent clustering of stagnation points and inertial particles », *J. Fluid Mech.* **553**, 143 (2006)

S. Goto & J. C. Vassilicos, « Self-similar clustering of inertial particles and zero-acceleration points in fully developed two-dimensional turbulence », *Phys. Fluids* **18**, 115103 (2006)

Modèles de sous maille préservant le groupe de symétrie des équations de Navier – Stokes

Aziz Hamdouni

Laboratoire d'Etude des Phénomènes de Transfert Appliqués au Bâtiment, Université de la Rochelle

Les équations de Navier-Stokes admettent des transformations sur les variables d'espace et de temps ainsi que sur les composantes de la vitesse et de la pression qui préservent l'ensemble des solutions. Ces transformations sont appelées groupe de symétries des équations de Navier-Stokes. Elles jouent un rôle fondamental dans l'existence de grandeurs conservées par l'application du théorème de E. Noether. C'est ainsi que la conservation du moment cinétique est liée à la symétrie par les rotations, la cascade d'énergie de Kolmogorov traduit la symétrie d'échelle, Les lois de parois sont reliées aussi à ces symétries comme il a été montré dans les travaux de M. Oberlack. Les mécanismes de la dynamique tourbillonnaire peuvent s'expliquer aussi par les symétries des équations de Navier-Stokes. En réalité les symétries traduisent la physique exprimée par les équations de Navier-Stokes. La conservation de ces symétries dans les modèles de turbulence garantit la conservation des propriétés physiques importantes de l'écoulement. Notre conjecture est que les modèles respectant le groupe de symétrie des équations de Navier-Stokes seront robustes et d'une grande universalité. Ainsi leur adaptation aux configurations complexes exigera moins «d'empirisme». Dans un travail antérieur, M. Oberlack a montré que la plupart des modèles de sous mailles existants ne préservent pas ce groupe. Nous avons étendu cette étude à d'autres classes de modèles de sous maille tant en écoulements isothermes qu'anisothermes. Nous avons donné aussi une méthode permettant de construire une classe de modèles LES préservant ce groupe de symétries. Cette approche utilise la théorie des invariants des groupes de Lie des équations aux dérivées partielles. Ces modèles n'ont pas besoin de lois de parois. En effet, par conservation des symétries des équations de Navier-Stokes, les lois de parois y sont implicitement incluses. La mise en œuvre de ces modèles pour des configurations de type cavité ventilées 3D donnent des résultats nettement de meilleures qualités que celles obtenues à partir du modèle de Smagorinsky ou du modèle dynamique.

D. Razafindralandy, A. Hamdouni & M. Oberlack, « Analysis and development of subgrid turbulence models preserving the symmetry properties of the Navier – Stokes equations », *Eur. J. Mech. B – Fluids* (2006), sous presse

Transport turbulent dans le Soleil

Nicolas Leprovost

University of Sheffield (Grande-Bretagne)

Pour comprendre la formation d'une région d'intense rotation différentielle dans le soleil et les propriétés du transport turbulent dans cette zone, nous étudions un système d'équations quasi-linéaires pour les fluctuations de vitesse et de concentration (ou de température). Nous calculons les viscosités et diffusivités turbulentes, en prenant en compte l'effet du cisaillement. En étudiant un modèle 2D (plan bêta), nous avons pu conclure que le rôle des ondes de Rossby sur le transport est très probablement négligeable devant celui des ondes d'Alfvén (c'est-à-dire du champ magnétique). Nous nous sommes ensuite intéressés à l'effet des ondes inertielles (c'est-à-dire d'une rotation globale) sur le transport turbulent lorsque le cisaillement et la rotation sont perpendiculaires (cas de l'équateur solaire). Dans ce cas, l'interaction entre le cisaillement et la rotation donne naissance à un flux non diffusif de moment angulaire, permettant d'expliquer l'apparition d'une zone de fort cisaillement dans le soleil.

N. Leprovost & E.-J. Kim, « Effect of Rossby and Alfvén waves on the dynamics of the tachocline », *Astrophys. J.* (2006), sous presse [[astro-ph/0607545](#)]

N. Leprovost & E.-J. Kim, « Effect of rotation on the tachoclinic transport » (2006) [[astro-ph/0612084](#)]

Convection à haut nombre de Rayleigh dans un canal vertical

Mathieu Gibert

Laboratoire de Physique, CNRS UMR 5672, Ecole Normale Supérieure de Lyon

Dans ce travail, on s'intéresse à la relation entre le flux de chaleur convectif et le gradient de température dans un canal vertical rempli d'eau au sein duquel le flux de masse vertical est nul en moyenne. Dans le cas de la convection de Rayleigh-Bénard, le transfert de chaleur est contrôlé en grande partie par les couches limites qui apparaissent naturellement aux voisinages des plaques et où le gradient de température est majoritairement concentré. Ce cas modèle paraît inapproprié pour décrire certaines situations naturelles comme la convection dans les étoiles, les planètes ou les océans pour lesquels ce type de confinement n'existe pas. Dans le système original que nous étudions, ces couches limites thermiques et visqueuses sont inexistantes, de ce fait le système de canal vertical n'a aucune longueur caractéristique dans la direction verticale et les diffusivités ne devraient pas intervenir dans le processus de la convection. C'est en effet ce que nous mesurons: un régime de convection inertiel, en considérant une longueur naturelle verticale différente de la largeur du canal. Nos résultats, désormais valables sur plus de quatre décades de nombre de Rayleigh, suggèrent de plus une relation forte entre les flux de quantité de mouvement et de chaleur dans les systèmes en convection naturelle, ce qui leur confèrent une grande plage d'applications.

M. Gibert, H. Pabiou, F. Chillà & B. Castaing, « High-Rayleigh-Number Convection in a Vertical Channel », *Phys. Rev. Lett.* **96**, 084501 (2006) [voir aussi: *Phys. Rev. Focus* **17**, story 9]

Transport de champ magnétique par un écoulement turbulent de sodium liquide

Michael Berhanu

Laboratoire de Physique Statistique, Ecole Normale Supérieure, Paris

Dans le cadre de la magnétohydrodynamique, l'équation d'évolution du champ magnétique correspond à l'advection d'un vecteur passif par l'écoulement, lorsque la rétroaction sur l'écoulement est négligeable. Des mesures dans l'expérience Von Karman Sodium ont permis de mettre en évidence pour la première fois cet effet. On

étudie le champ magnétique induit pour un nombre de Reynolds magnétique de l'ordre de 30, à partir d'un champ magnétique « localisé ». On utilise un aimant placé dans un tube au coeur de l'écoulement produisant un champ magnétique de 0.1 Tesla au contact, mais dont le champ passe en dessous du champ magnétique terrestre à une distance de l'ordre de 150 mm, lorsque l'écoulement est au repos. Le champ magnétique est mesuré par des sondes à effet Hall, à des distances de l'aimant comprises entre 200 et 360 mm. Pour la configuration expérimentale choisie il n'y a pas d'écoulement moyen de l'aimant vers la sonde. On mesure donc l'effet du transport par les fluctuations turbulentes. On observe ainsi un champ advecté de moyenne nulle, mais d'écart type linéaire avec la vitesse de l'écoulement et d'amplitude supérieure au champ magnétique terrestre et fortement intermittent. On note aussi que l'amplitude du champ magnétique semble décroître exponentiellement avec la distance à l'aimant, néanmoins on constate que le champ magnétique reste temporellement très corrélé pour les différents points de mesure. Enfin on remarque que les événements de champ magnétique se font selon une direction privilégiée qui n'est pas celle du dipôle de l'aimant. Ces mesures devraient bientôt être complétées pour des configurations d'écoulements différentes, dans une nouvelle expérience à l'ENS Paris utilisant du gallium liquide.

R. Volk, F. Ravelet, R. Monchaux, M. Berhanu, A. Chiffaudel, F. Daviaud, Ph. Odier, J.-F. Pinton, S. Fauve, N. Mordant & F. Pétrélis, « Transport of Magnetic Field by a Turbulent Flow of Liquid Sodium », *Phys. Rev. Lett.* **97**, 074501 (2006)