

Projets expérimentaux 2010-15
Stéphan Fauve
Paris, le 24 juin 2009-06-24

Contexte général

Ce projet a été suscité par une discussion avec Yves Couder il y a environ un an, au cours de laquelle il m'a demandé si j'étais intéressé par développer une activité expérimentale à l'Université Paris 7. Mes activités de recherche sur les instabilités hydrodynamiques et les phénomènes non linéaires sont en effet proches de celles de plusieurs chercheurs du laboratoire MSC. J'ai ainsi discuté de projets scientifiques envisageables avec Laurent Limat et Eric Falcon. J'ai eu également l'occasion d'évoquer quelques aspects plus pragmatiques concernant l'éventualité de ces activités à Paris 7 avec Jean-Marc di Meglio, Yannick Giraud-Héraud, Pierre Binétruy, Carlo Sirtori et Thomas Patzak. Il y a quelques mois, j'ai présenté mon thème de recherche et quelques résultats obtenus au cours d'un séminaire commun aux trois laboratoires du bâtiment Condorcet. Plus récemment, j'ai été contacté par Luc Valentin qui m'a demandé si je pouvais prendre part au développement des activités de recherche sur l'énergie en projet à Paris 7. Après ce bref historique, je vais donner quelques indications sur les activités scientifiques qui pourraient être envisagées et sur leur positionnement par rapport à celles dans lesquelles je suis impliqué actuellement.

Contexte scientifique

Mon travail de recherche actuel comporte deux aspects :

- 1) la turbulence d'ondes, qui consiste à étudier les propriétés dynamiques et statistiques d'un ensemble d'ondes en interaction non linéaire. C'est un sujet qui, depuis quelques dizaines d'années, est centré sur des aspects théoriques de physique statistique et/ou non linéaire mais peu d'expériences de laboratoire ont été effectuées. Jusqu'à une période récente, la plupart des mesures analysées à l'aide des concepts de turbulence d'ondes provenaient de données satellites sur les ondes à la surface de l'océan ou dans le vent solaire. Nous développons des expériences de laboratoire sur ce sujet depuis quelques années avec Eric Falcon et nous disposons pour cela d'un financement commun de l'ANR jusqu'à fin 2011. Actuellement, des ondes de surface sont étudiées à MSC et des ondes de flexion sur des plaques élastiques dans notre équipe au LPS à l'ENS. Quelques expériences similaires sont en cours de développement au sein d'autres groupes.
- 2) Le second aspect de mon travail concerne les instabilités magnétohydrodynamiques (MHD) et l'effet dynamo, c'est à dire, la génération d'un champ magnétique par l'écoulement turbulent d'un métal liquide. J'ai proposé une configuration expérimentale que nous avons développée à partir de 1993. Cette expérience a fait l'objet d'une collaboration (VKS) entre le CEA Saclay et les ENS (Lyon et Paris) à partir de 1998. L'effet dynamo a été observé en 2006, ainsi que les renversements aléatoires du champ magnétique engendré. Cette expérience, effectuée avec du sodium liquide au CEA Cadarache, dispose d'un financement de l'ANR jusqu'à fin 2011, ce qui doit permettre d'en achever l'étude. Nous menons en parallèle au LPS des expériences de MHD de taille plus réduite et utilisant du gallium liquide.

Au plan international, l'activité de recherche sur l'effet dynamo implique plusieurs projets en cours de discussion ou d'élaboration : obtention d'une dynamo dans un plasma confiné dans une sphère de 1 mètre de diamètre (Université de Madison, USA), projet Ampère au niveau européen (configuration à définir), obtention d'une dynamo dans une sphère en rotation contenant 13 tonnes de sodium liquide (Université du Maryland, USA). Ce dernier projet est le seul à être au stade de la réalisation expérimentale mais les premiers tests avec du sodium n'ont pas encore été effectués. Il fait l'objet d'une demande de programme de coopération internationale de la NSF dans laquelle nous sommes impliqués. Tous ces projets qui sont en discussion depuis plusieurs années, doivent à présent mieux définir les nouveaux objectifs scientifiques qu'ils entendent poursuivre suite à l'observation d'une dynamo turbulente dans l'expérience VKS. Quel que soit l'avenir de ces différents projets, ou, pourquoi pas, d'un nouveau projet français de taille comparable, des résultats expérimentaux nouveaux ne seront probablement pas obtenus avant plusieurs années.

En parallèle à ces projets d'expériences lourdes, d'autres problèmes de MHD peuvent être étudiés à une échelle plus modeste. C'est en priorité ce type d'expériences que j'envisage de développer au cours des prochaines années.

1) Un champ magnétique engendré à partir de gradients de température et/ou de concentration

L'exemple du champ magnétique terrestre est une bonne illustration du problème que l'on se pose. Il est admis que les écoulements au sein du noyau liquide sont engendrés en raison des gradients de température et de concentration. Cette convection fonctionne donc à la manière d'une machine thermique engendrant de l'énergie cinétique (écoulement) à partir d'échanges de chaleur entre source chaude et source froide. Cette énergie cinétique de l'écoulement est ensuite partiellement transformée en énergie magnétique par effet dynamo. On peut se demander pour quelles raisons il n'est pas plus efficace d'avoir un champ magnétique résultant des courants électriques qui pourraient être engendrés par effet thermoélectrique. Outre les gradients thermiques, le noyau terrestre possède des gradients de concentration impliquant des métaux différents (principalement fer et nickel). Ceci semble donc propice à la génération de courants par effet thermoélectrique. Ce mécanisme a été évoqué mais sa contribution n'a jamais été sérieusement estimée, probablement parce que d'autres caractéristiques du champ magnétique terrestre sont en faveur d'un effet dynamo. Un mécanisme thermique similaire avait été par contre invoqué afin d'expliquer l'existence d'un champ magnétique mesuré au niveau d'un circuit de refroidissement au sodium liquide d'un réacteur nucléaire en URSS mais, là encore aucune étude précise n'avait été effectuée.

Le problème expérimental est donc simplement posé : il consiste à tenter d'observer un champ magnétique engendré par un écoulement de métal liquide de dimension modeste (donc ne pouvant donner lieu à un effet dynamo) en superposant à cet écoulement une géométrie appropriée de gradients thermiques imposés.

Trouver des mécanismes autres que l'effet dynamo pour engendrer un champ magnétique dans un fluide conducteur n'est pas uniquement une alternative à l'effet dynamo ; cela peut permettre de créer le germe de champ qui est ensuite amplifié par effet dynamo.

Dans le cas du champ magnétique des galaxies par exemple, c'est le mécanisme par lequel le germe initial a été créé qui pose problème actuellement plus que le mécanisme d'amplification lui même.

2) Ondes et turbulence MHD

La turbulence hydrodynamique dans un métal liquide peut-être qualitativement modifiée par l'effet d'un champ magnétique appliqué. Ce problème a été principalement étudié dans la limite où les ondes d'Alfvén qui sont dues à la présence du champ magnétique, sont fortement amorties. Dans ce cas, l'effet du champ magnétique est principalement d'induire une dissipation anisotrope. Aucune expérience n'a par contre étudié à ce jour le régime de transition d'une turbulence hydrodynamique vers une turbulence d'ondes d'Alfvén. Quelques expériences sur les ondes d'Alfvén ont été effectuées en régime non turbulent avec un champ appliqué uniforme. Ce cas est le plus simple à traiter analytiquement mais pas à réaliser expérimentalement. Par ailleurs, ce n'est pas une situation réaliste du point de vue de la géophysique ou de l'astrophysique.

Plutôt qu'imposer un champ magnétique homogène sur un grand volume à l'aide de bobines externes, nous nous proposons de tirer profit de la très faible résistance d'un volume de métal liquide afin d'y faire circuler de fortes intensités sous une faible tension. Le champ magnétique ainsi créé peut avoir une géométrie plus proche de celle du champ d'objets astrophysiques et une intensité suffisante pour l'étude du régime d'Alfvén.

Au niveau fondamental, ce type d'étude relève du cas où la turbulence hydrodynamique peut se coupler à des ondes. Cela se produit aussi pour les écoulements à nombre de Mach élevés (ondes acoustiques), dans les fluides en rotation (ondes inertielles) et dans les fluides à surface libre (ondes de gravité et ondes capillaires). La modification de la phénoménologie de la turbulence dans ces différents cas est encore assez mal comprise dans le domaine de transition d'un régime extrême (pas d'ondes) à l'autre (ondes avec un rôle dominant).

3) Transport de chaleur avec changement de phase au voisinage du point critique

Un problème de nature différente des précédents, auquel j'envisage également de m'intéresser au cours des prochaines années, est le transport de chaleur entre une source chaude et une source froide lorsqu'il s'accompagne d'une transition liquide-vapeur. De nombreux échangeurs industriels fonctionnent sur ce principe. La vapeur s'élève par convection thermique au dessus de la surface chaude, se condense en arrivant sur la surface froide et retombe sous forme de gouttelettes liquides qui se vaporisent lorsqu'elles atteignent la surface chaude. L'échange de chaleur est plus efficace qu'en l'absence de transition de phase car il tire parti de la chaleur latente de vaporisation. Le flux de chaleur dans un fluide homogène soumis à un gradient de température a fait l'objet d'un très grand nombre d'études expérimentales et différentes lois asymptotiques en régime de convection turbulente ont été discutées. Par contre, le cas avec transition de phase a été très peu étudié. Il est particulièrement intéressant au voisinage du point critique liquide-

vapeur car les paramètres pertinents (chaleur latente, compressibilité, conductivité thermique, etc) peuvent être facilement modifiés en fonction de la distance au point critique. Au voisinage du point critique, le fluide devient très compressible de sorte qu'il se comprime sous l'effet de son propre poids ; ceci conduit à une stratification forte analogue à celle que l'on a, sur des échelles beaucoup plus grandes, pour l'atmosphère terrestre.

On dispose donc d'un « modèle-jouet » d'échangeur thermique, d'une grande flexibilité quant aux gammes de paramètres explorables, et qui permet de reproduire au laboratoire un mini-cycle de précipitations. L'étude de la fréquence de nucléation des gouttes liquides, de leur taille, etc en fonction des paramètres du problème, et leur effet sur le flux de chaleur, peuvent être facilement quantifiés. C'est un sujet où il reste beaucoup à comprendre, les quelques expériences précises ayant montré des comportements surprenants.

Les sujets mentionnés ci-dessus ont un point commun : deux phénomènes physiques y sont impliqués simultanément, une instabilité et un mécanisme de transformation d'énergie. Cela peut sembler surprenant au premier abord car on a coutume de ne considérer que le rôle négatif des instabilités, celui à l'origine de la limitation du rendement de nombreux processus (un exemple classique est la limitation du rendement de la production d'aluminium par l'instabilité d'ondes de surface qui se produit lorsque l'on tente de limiter les pertes par effet Joule). C'est pourquoi un thème de recherche en vogue dans le domaine est le contrôle des instabilités. L'exemple canonique est le contrôle des sillages, qui en limitant la turbulence, devrait permettre de faire voler les avions de façon plus économique. Sans nier ou au contraire amplifier les applications potentielles qui peuvent résulter du contrôle des instabilités, je suis plutôt motivé par mettre en évidence leur rôle positif : dans le cas de l'effet dynamo, par exemple, c'est un mécanisme d'instabilité qui permet de transformer un travail mécanique en courant électrique, même en l'absence de champ magnétique externe imposé (aimant permanent). Le point commun aux expériences mentionnées précédemment est donc de rechercher d'autres exemples d'instabilités qui rendent possible un processus de transformation d'énergie. Il s'agira ensuite d'étudier les mécanismes impliqués, leurs limitations et l'efficacité de ces processus par rapport à ceux qui sont employés de façon courante.

Quelques aspects pratiques

L'équipe impliquée actuellement comporte 3 chercheurs permanents (S. Fauve, prof ENS, N. Mordant, MCF ENS et F. Pétrélis, CR CNRS), 1 postdoc (A. Alexakis) et 2 thésards (B. Gallet et C. Gissinger). Sans pouvoir s'avancer sur leur nombre, il est probable que des chercheurs de MSC seront intéressés par participer à ce projet. Le développement des expériences mentionnées ci-dessus nécessite une surface de 100 à 200 m². Il faut prévoir à terme une puissance électrique maximale disponible de 100 kW, même si celle-ci ne sera utilisée que sur des durées courtes, et donc un échangeur thermique (une climatisation). Des cloisons seront nécessaires à l'isolation phonique des moteurs utilisés (bruit comparable aux machines d'un atelier). A ce propos, il sera indispensable d'avoir accès à un atelier de mécanique.