

Rapport scientifique en vue du renouvellement du GDR Dynamo (Code GDR2060)

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte scientifique

L'effet dynamo consiste en la génération d'un champ magnétique par déplacement d'un milieu conducteur d'électricité. Cette question de la conversion d'énergie cinétique en énergie magnétique demeure un problème fondamental non résolu. Ses enjeux vont de la compréhension du mécanisme lui-même, à ses conséquences sur le système solaire, l'environnement voire l'activité humaine. Les chercheurs impliqués dans l'étude de l'effet dynamo appartiennent traditionnellement à quatre disciplines: i) les mathématiques (équations aux dérivées partielles, systèmes dynamiques,...); ii) la physique (instabilités non-linéaires en présence de bruit, plasmas); iii) la géophysique (origine et dynamique du champs magnétique terrestre); iv) l'astrophysique (étoiles, galaxies, environnement solaire).

L'idée que l'origine du champ magnétique terrestre provienne du déplacement d'un fluide conducteur est généralement attribuée à Larmor (1919). Elle a motivé de nombreux travaux théoriques, qui se poursuivent encore à ce jour. Du point de vue expérimental, il a fallu attendre les travaux de Lowes et Wilkinson (1963) pour obtenir une première démonstration de l'effet dynamo dans une expérience à rotor solide, dont la théorie avait été faite par Hertenberg en 1957. Ces quinze dernières années se sont traduites par une forte croissance de nos connaissances dans le domaine, grâce notamment aux idées issues des systèmes dynamiques (scénario stretch, twist, fold), des simulations numériques tridimensionnelles, et beaucoup plus récemment des expériences mettant en œuvre des écoulements de sodium liquide. Ces expériences, mises en œuvre par les équipes de Riga et Karlsruhe en 1999, reproduisent des écoulements "modèles" très simples, dont les propriétés vis à vis de l'effet dynamo avaient été calculées analytiquement (Ponomarenko, Roberts). De nombreuses équipes se sont récemment engagées dans la réalisation et l'étude de dynamos fluides expérimentales non-contraintes, plus proches des conditions naturelles d'existence: trois aux Etats-Unis (Maryland, Wisconsin, Los Alamos), une en Russie (Perm), deux en France (Cadarache, Grenoble).

Ces dernières expériences sont issues d'un groupe de travail regroupant des équipes du CEA et de trois départements du CNRS, constitué en 1996 au sein du GdR "Mécanique des Fluides Géophysiques et Astrophysiques", et qui s'est conclu par la rédaction d'un avant-projet "Ampère" (52 pages, juin 1997, coordination F. Daviaud et J. Léorat).

1.2. Objectifs

Fort de cette expertise croissante au niveau français, un GDR dynamo a été créé en janvier 2002, afin d'organiser la recherche en France autour des thèmes liés à la dynamo et à la

magnétohydrodynamique et de faire émerger une implication de la communauté concernée au niveau européen. Les différentes communautés travaillant sur des sujets touchant à l'effet dynamo venaient d'horizons divers:

- Mathématiques (SPM/Section 01)
- Physique non-linéaire (SPM/Section 02)
- Physique des plasmas (SPM/Section 04)
- Mécanique des fluides et turbulence (SPI/Section 10)
- Géophysique (SDU/Section 17)
- Astrophysique (SDU/Section 18)

Du fait de l'étendue des communautés susceptibles d'interagir au sein de ce GDR, une direction collégiale a été mise en place. Elle était composée d'un directeur (B. Dubrulle) et d'un comité de 6 personnes, émergeant dans les différentes équipes et sections du CNRS impliquées dans les thèmes du GDR: J-P. Branchet (Nancy/Section 10), Ph. Cardin (Grenoble/Section 17), F. Daviaud (CEA), J. Léorat (Meudon/Section 18), J-F. Pinton (Lyon/Section 2), H. Politano (Nice/Section 10).

Au cours de son mandat, la mission du Groupement a été d'organiser régulièrement des réunions annuelles globales tournant dans des lieux différents sur le thème défini par l'équipe d'accueil. Le GDR a également favorisé les interactions en contribuant à la tenue d'ateliers plus spécifiques et de collaborations entre des équipes françaises, ainsi qu'à des colloques sur des thèmes voisins de la dynamo. Le GDR a également servi de nœud français dans diverses demandes effectuées à l'échelle européenne. Enfin, le GDR Dynamo est apparu comme l'interlocuteur privilégié du CNRS lors de négociations de grands projets, comme le projet Ampère. Nous détaillons par la suite l'ensemble de ces contributions, et développons un argumentaire pour justifier la demande de renouvellement du GDR.

1.3. Le GDR Dynamo en quelques chiffres

Nombre de chercheurs impliqués : 99 (voir la liste nominative en annexe A)

Nombres de laboratoires impliqués : 23

Nombre de publications communes : 21

Nombre de thèses soutenues : 12

Bilan financier :

Ressources (en euros)

| Nature | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | Total 4 ans |
|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| SPM (puis MIPPU) | 5500 | 10000 | 15000 | 15000 | 45500 |
| SDU (puis MIPPU) | 5000 | 5000 | 5700 | - | 15700 |
| SPI | 0 | 3000 | 0 | 0 | 3000 |
| DR1 ⁽¹⁾ | 0 | 0 | 5600 | 0 | 5600 |
| Transfert MFGA ⁽²⁾ | 5200 | | | | 5200 |
| Total | 15700 | 18000 | 26300 | 15000 | 75000 |

Dépenses (en euros)

| Nature | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 ⁽³⁾ | Total 4 ans |
|------------------|-------------|--------------|--------------|---------------------|--------------|
| réunions | 4500 | 12000 | 10000 | 20000 | 46500 |
| comité | 1000 | 500 | 500 | 500 | 2500 |
| colloques | | 2000 | 7000 | | 9000 |
| collaborations | | | 9500 | 1600 | 11100 |
| Projet Ampère | | | 2000 | 3000 | 5000 |
| Total (3) | 5500 | 14500 | 29000 | 25100 | 74100 |

- (1) subvention destinée au projet Ampère (réunions, voyages)
(2) don de l'ancien GDR MFGA
(3) estimation au 1^{er} juin

Le bilan scientifique du GDR est présenté ci-dessous. L'animation scientifique organisée par le GDR, tant au niveau national qu'europpéen, est ensuite exposée (p. 31). La prospective pour le renouvellement du GDR se trouve au chapitre 4 (p. 38). Les différentes Annexes (A,B,C et D) sont données en fin de document.

2. BILAN SCIENTIFIQUE

Les thèmes de travail qui ont été abordés durant la durée du groupement concernent:

- 2.1 Aspects théoriques de la magnétohydrodynamique et de l'effet dynamo (p. 4)
- 2.2 Modélisation numérique (p. 10)
- 2.3 Expériences et mesures (p. 17)
- 2.4 Magnétohydrodynamique et effet dynamo dans les milieux naturels (p. 24)

2.1. Aspects théoriques de la magnéto-hydrodynamique et de l'effet dynamo

Au cours des quatre dernières années, une part importante des activités théoriques a été orientée vers la compréhension des récents résultats expérimentaux ayant mis en évidence l'instabilité dynamo dans des écoulements contraints de sodium liquide. Il s'agit d'une part du problème du seuil d'instabilité dynamo en fonction soit des conditions aux limites pour le champ magnétique soit des fluctuations de vitesse de l'écoulement. D'autre part, la description du comportement du champ magnétique au-delà du seuil d'instabilité a été prédite que ce soit par analyse dimensionnelle ou par calcul de l'équivalent d'équations de Fokker-Plank pour le champ magnétique.

En outre, des activités de recherche motivées par les problèmes de géodynamo ont été poursuivies, que ce soit pour la description d'instabilités de couches limites ou pour l'estimation des dissipations dans ces couches limites.

Nous présentons maintenant les résultats obtenus par les différentes équipes et leurs collaborations.

2.1.1. Equipe du LEGI (Grenoble)

R. Avalos-Zuñiga, M. Peyrot, F. Plunian.

Influence des conditions aux limites électromagnétiques sur l'apparition de l'effet dynamo

La difficulté d'obtenir un effet dynamo a conduit les expérimentateurs à s'interroger sur la façon de modifier les conditions aux limites électromagnétiques d'une expérience pour diminuer le seuil de l'instabilité dynamo (Ravelet *et al.* 2005). Pour une géométrie cylindrique, il a été montré avec R. Avalos-Zuñiga que l'ajout d'une couche latérale de matériau de même conductivité que le fluide en mouvement diminue sensiblement le seuil (jusqu'à 60%). Cependant des différences existent en fonction du type de bifurcation attendu (Hopf ou stationnaire).

Influence de la turbulence sur le seuil de l'instabilité dynamo

Comprendre le rôle de la turbulence sur l'apparition de l'effet dynamo est crucial pour les expérimentateurs. Avec N. Leprovost et B. Dubrulle, a été appliqué le formalisme mis au point dans la thèse de N. Leprovost (2004) à la géométrie de la dynamo-disque de Bullard. L'existence d'un scénario d'apparition de l'effet dynamo en deux étapes a été mis en évidence: une première impliquant des bouffées intermittentes de champ magnétique, suivie d'une transition vers une dynamo turbulente, avec un champ magnétique non nul.

Dans le cadre de la thèse de M. Peyrot (2004-2007) et avec C. Normand a été étudié la sensibilité du seuil dynamo aux caractéristiques principales de la turbulence (échelle, intensité) pour deux

classes de dynamos (avec et sans séparation d'échelles entre l'écoulement moyen et le champ magnétique).

Thèse soutenue:

Quelques études théoriques relatives aux dynamos expérimentales, R. Avalos-Zuñiga (2005).

Etudiants encadrés :

Marine Peyrot (thèse, 2004-2007), Cyrille Fargant (Master 2, 2005).

Collaborations au sein du GDR :

C. Normand, N. Leprovost, B. Dubrulle, F. Daviaud (CEA Saclay)

Publications:

Avalos-Zuñiga, R., Plunian, F., Influence of inner and outer walls electromagnetic properties on the onset of a stationary dynamo, *Eur. Phys. J. B*, **47**, 127-135 (2005).

Avalos-Zuñiga, R., Plunian, F., Gailitis, A., Influence of electromagnetic boundary conditions onto the onset of dynamo action in laboratory experiments, *Physical Review E*, **68**, 066307 (2003).

Leprovost, N., Dubrulle, B., Plunian, F., Instability of the homopolar disk-dynamo in presence of white noise, *Magnetohydrodynamics*, soumis (2006).

Conférences :

Avalos-Zuñiga, R., Plunian, F., Gailitis, A., Influence des conditions aux limites électromagnétiques sur le seuil de l'instabilité dynamo, Proc. 16th Congrès Français de Mécanique, Nice, France (2003).

Avalos-Zuñiga, R., Plunian, F., Gailitis, A., Influence of electro-magnetic boundary conditions onto the onset of dynamo action in laboratory experiments, Mathematical aspects of Natural Dynamos, Caramulo, Portugal (2003)

Leprovost, N., Dubrulle B., Plunian, F., Intermittency in homopolar dynamo, Proc. 15th Riga and 6th PAMIR Int. Conf., Fundamental and Applied MHD, Riga, Lettonie (2005).

2.1.2. Equipe du CEA (Saclay)

N. Leprovost, R. Monchaux, A. Chiffaudel, B. Dubrulle, F. Daviaud, C. Normand

Influence de la turbulence sur le seuil de l'instabilité dynamo

En modélisant la turbulence par des fluctuations stochastiques, nous avons pu mettre en évidence que la bifurcation de l'instabilité dynamo se faisait tout d'abord vers une dynamo intermittente (caractérisée par des pics d'activité magnétique séparés par des périodes où le champ magnétique est quasiment nul). Pour des nombres de Reynolds magnétique plus élevés, la solution intermittente bifurque vers une solution pleinement turbulente. Des critères définissant le seuil d'apparition des dynamos intermittentes et turbulentes ont été dérivés. De plus, nous avons réalisé des simulations numériques de l'équation d'induction avec un champ de vitesse de type Taylor-Green soit issu du système MHD complet soit issu du problème hydrodynamique auquel est superposée des fluctuations stochastiques. Nous avons alors montré que les fluctuations de vitesse avaient un effet significatif sur la position du seuil de bifurcation et que l'effet était similaire dans les deux cas: lorsque les fluctuations sont principalement à grande échelle,

l'instabilité dynamo est retardée alors qu'elle peut être favorisée pour un bruit à petite échelle. Néanmoins, le résultat est dans ce cas sensible au temps de corrélation de la turbulence et au nombre de Prandtl magnétique (rapport entre le Reynolds magnétique et le Reynolds cinétique).

Mécanique statistique des écoulements axisymétriques

En utilisant une approche de type mécanique statistique, nous nous sommes intéressés aux états d'équilibre de la turbulence MHD axisymétrique. Nous avons montré que le champ moyen (à grande échelle) est une solution stationnaire des équations de la MHD axisymétrique et coïncide avec les solutions obtenues par un principe de minimisation de l'énergie. Nous avons aussi obtenu des prédictions concernant les fluctuations autour de l'état d'équilibre: leur distribution est universelle et Gaussienne. En utilisant cette propriété, nous avons montré que l'énergie (cinétique) était la quantité où les fluctuations avaient le plus d'importance et donc en présence d'une petite viscosité, on s'attend à ce qu'elle soit la plus dissipée. Cette constatation permet de justifier que les solutions obtenues par notre approche de mécanique statistique coïncident avec celles obtenues en minimisant l'énergie.

Méthode Galerkin pour les calculs de seuil de dynamo

En relation avec les expériences VKS de Cadarache, le seuil de l'instabilité dynamo a été calculé pour des écoulements modèles de type Von Karman. La méthode de Galerkin utilisée repose sur une décomposition du champ magnétique selon les modes propres de diffusion en géométrie cylindrique. Cette méthode, qui se ramène à un problème aux valeurs propres pour le taux de croissance de l'instabilité, est bien adaptée au calcul du seuil dynamo. On s'est intéressé à plusieurs classes d'écoulements possédant des caractéristiques spatiales spécifiques afin de tester leur aptitude à engendrer l'effet dynamo. Le seuil le plus bas est atteint pour écoulement (le MND flow) qui, s'il était réalisable, produirait la dynamo pour un nombre de Reynolds magnétique de l'ordre de 50 en l'absence de toute fluctuation temporelle.

Thèses soutenues :

« Influence des petites échelles sur les grandes échelles en turbulence hydro et magnétohydrodynamique », soutenue le 29 novembre 2004, N. Leprovost

Etudiants encadrés :

Ph. Michel, (Master 2, 2003), R. Dolganov (Master 2, 2004), P. Blaineau (INSA, 2005), O. Lopez (ENSTA, 2006), R. Jover (Master 1, 2006)

Collaborations au sein du GDR :

F. Plunian, M. Peyrot (LEGI, Grenoble)

Publications:

N. Leprovost and B. Dubrulle. The turbulent dynamo as an instability in presence of multiplicative noise, *Eur. Phys. J. B* **44**, 395 (2005).

J.-P. Laval, P. Blaineau, N. Leprovost, B. Dubrulle and F. Daviaud. Influence of turbulence on the dynamo threshold, *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 204503 (2006).

N. Leprovost and E.-j. Kim. Self-consistent mean field theory in weakly ionized media, *Astrophys J.* **598**, 2 (2003).

N. Leprovost, B. Dubrulle and P.-H. Chavanis. Thermodynamics of MHD flows with an axial symmetry, *Phys. Rev. E* **71**, 36311 (2005).
L. Marié, C. Normand, F. Daviaud, Galerkin analysis of kinematic dynamos in the von Karman geometry, *Physics of Fluids*, **18**, 1 (2006)

2.1.3. Equipe de l'IPG (Paris)

E. Dormy.

Couches limites d'intérêt géophysique

La viscosité du noyau liquide terrestre est si petite que les couches limites nécessaires pour annuler la vitesse aux parois sont souvent négligées. Quand elles ne le sont pas, leur effet est souvent paramétré en utilisant une description analytique pour la couche laminaire. Il a été montré que pour la gamme des paramètres géophysiquement réalistes, la couche limite peut développer des instabilités (dans la région équatoriale), ce qui souligne le rôle potentiellement important des couches limites sur la dynamique du noyau fluide (Desjardins, Dormy, Grenier, 1999, 2001, 2004). Avec David Gérard-Varet, sont étudiés les effets de la rugosité de petite échelle sur les couches limites hydrodynamiques en rotation ; montrant qu'elle peut augmenter ou réduire la dissipation visqueuse en fonction de ses caractéristiques (article en révision mineure pour JFM).

Comportements asymptotiques des équations de la MHD

Les travaux en cours et projets avec le Département de Mathématiques et Applications de l'ENS, dans l'Equipe EDP dirigée par Benoît Perthame, sont nombreux. Avec Benoît Desjardins sont étudiés les passages à la limite rigoureux pour établir les équations de la MHD de façon rigoureuse sous les approximations anélastiques et Boussinesq (couramment utilisées pour les applications naturelles).

Avec David Gérard-Varet, est abordé le problème de passage à la limite pour les dynamos rapides (limite des grands nombres de Reynolds magnétiques) en présence de fluctuations (bruit multiplicatif infinitésimal). Enfin avec François Bouchut (DMA) est menée une collaboration sur les solveurs de Godunov et la construction de solveurs de Riemann numériques permettant une résolution numérique stable pour la magnétohydrodynamique idéale.

Etudiants encadrés :

V. Morin (Thèse)

Collaborations au sein du GDR :

E. Grenier

Publications:

Gerard-Varet D., Dormy E. « Ekman layers near wavy boundaries », soumis à *Journal of Fluid Mechanics*, sous presse.

Iskakov A., Dormy E. (2005) « On magnetic boundary conditions for non-spectral dynamo simulations », *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics*, **99-6**: 481492.

Dormy E., Soward A., Jones C., Jault D., Cardin P. (2004) « The onset of thermal convection in rotating spherical shells », *Journal of Fluid Mechanics*, **501** : 43-70.

Desjardins B., Dormy E., Grenier E. (2004) « Boundary layer instability at the top of the Earth's outer core », *Journal of Computational and Applied Mathematics*, **166** : 123-131.

2.1.4. Equipe de l'ENS (Paris)

F. Pétrélis, S. Fauve

Influence de la turbulence sur le seuil de l'instabilité dynamo

Des résultats expérimentaux récents pour des écoulements contraints montrent que le seuil d'instabilité dynamo est très peu sensible à la composante turbulente de l'écoulement. Le déplacement du seuil causé par ces fluctuations modélisées par un bruit a été calculé perturbativement en fonction de l'amplitude des fluctuations. Le déplacement est nul au premier ordre. Une formule est déterminée au second ordre. Si les fluctuations sont de petites échelles, l'effet est alors proportionnel à leur hélicité. Les résultats expérimentaux de faible déplacement du seuil sont probablement liés au faible taux d'hélicité des fluctuations turbulentes.

Saturation de l'instabilité dynamo

L'énergie magnétique que peut engendrer un écoulement au dessus du seuil d'instabilité a été prédite. Sur un modèle simple (dynamo de Ponomarenko), une équation d'amplitude a été calculée: elle prouve que la bifurcation est supercritique et donne la valeur de l'énergie magnétique à saturation. Dans ce cas, c'est le terme visqueux de l'équation de Navier-Stokes qui régit le transfert d'impulsion et contrôle l'amplitude du champ magnétique à saturation.

L'ordre de grandeur du champ magnétique obtenu par le calcul précédent est mille fois plus petit que celui mesuré par les récentes expériences ayant mis en évidence l'instabilité dynamo. Par analyse dimensionnelle, d'autres lois d'échelle pour le champ magnétique ont été prédites. Ces lois dépendent du mécanisme assurant le transfert d'impulsion. Pour des écoulements turbulents, comme c'est le cas dans les expériences, c'est le terme inertiel qui entre en jeu. L'ordre de grandeur du champ estimé est alors cohérent avec celui obtenu expérimentalement. Dans le cas de la dynamo terrestre, seule une saturation pour laquelle la force de Coriolis entre en jeu donne des ordres de grandeur du champ réalistes.

Thèse soutenue :

« Effet dynamo : Etude des mécanismes d'instabilité et de saturation du champ magnétique », soutenue le 20 décembre 2002 par F. Pétrélis.

Publications:

S. Fauve et F. Pétrélis, pp. 1-64, ``Peyresq Lectures on Nonlinear Phenomena, Vol. II'', Ed. J-A Sepulchre, World Scientific (Singapour, 2003).

S. Fauve et F. Pétrélis, 14 pages dans ``Mathematical Aspects of Natural Dynamos'', Ed. E. Dormy (à paraître).

A Nunez et al., Comptes-rendus de la conférence ``Dynamo and Dynamics, a mathematical challenge'', Kluwer Academic Publishers (2001).

F. Pétrélis et S. Fauve, *Eur. Phys. J. B.* **22**, 273-276 (2001).

2.2. Modélisation numérique

Au cours de ces 4 années de nombreuses collaborations ont permis des avancées significatives dans le domaine de la simulation numérique des phénomènes de magnétohydrodynamique (MHD) et sur l'effet dynamo. En effet, à travers de nombreux résultats et de nouvelles méthodes numériques, il a été possible de mieux comprendre le rôle des fluctuations de vitesse sur le seuil de la dynamo, mais aussi d'atteindre des régimes de paramètres physiques non encore explorés (les faibles nombres de Prandtl magnétique) présents dans les métaux liquides. Différentes approches numériques sont considérées: modélisations des petites échelles, raffinement de mailles automatique, gestion de conditions aux limites beaucoup plus réalistes pour le fluide ou le champ magnétique.

Ces avancées, présentées ci-dessous par projet, sont obtenues, la plupart du temps, grâce à des collaborations entre les différentes équipes du GDR. Elles ont donné lieu à des publications en commun.

2.2.1. Modèles en couches pour la turbulence MHD homogène et isotrope

F. Plunian (LEGI, Grenoble)

Dans le cadre d'un programme Econet, dirigé par J.-F. Pinton et en connexion avec les thématiques du GDR Dynamo, nous modélisons avec R. Stepanov la turbulence MHD à l'aide de modèles en couches. Le modèle GOY, version très simplifiée des équations de Navier-Stokes, permet de simuler de très hauts nombres de Reynolds tout en reproduisant les caractéristiques principales de la turbulence (spectres, intermittence). Dans sa version MHD, ce modèle nous a permis d'étudier le cas de faibles nombres de Prandtl magnétique. On trouve, par exemple, que le seuil de la dynamo atteint un plateau dans la limite de faibles nombres de Prandtl magnétique conformément aux résultats de Ponty *et al.* (2005). Par ailleurs, on retrouve la loi d'échelle turbulente proposée par Pétrélis et Fauve (2001) pour un régime de saturation juste au-dessus du seuil. Une des caractéristiques du modèle GOY est que les transferts d'énergie sont locaux. Récemment, nous avons développé un nouveau modèle en couches afin de prendre en compte la non localité des transferts d'énergie.

Publications:

Stepanov, R., Plunian, F. Fully developed turbulent dynamo at low Prandtl numbers *Journal of Turbulence*, sous presse.

Conférences:

Stepanov, R. Plunian, F., Influence of low Pm on the turbulent MHD dynamo, Perm Dynamo Days Workshop, Perm, Russie (2005).

Plunian F., Stepanov R., Investigation of dynamo action in the small Pm limit using a MHD shell model, Program on Stellar Dynamos, Isaac Newton Institute, Cambridge, UK (2004).

2.2.2. Etude d'une dynamo turbulente à séparation d'échelles

F. Plunian (LEGI, Grenoble) & Y. Ponty (OCA, Nice)

Depuis 2006, nous étudions numériquement l'effet dynamo généré par un écoulement turbulent lorsque l'échelle (spatiale) de l'écoulement moyen (moyenne temporelle) est petite devant celle

du champ magnétique. L'étude du seuil de la dynamo est examinée en fonction du Prandtl magnétique et le mécanisme est caractérisé a posteriori en terme d'effet alpha (de la théorie du champ moyen).

Une expérience de première génération a déjà fonctionné à Karlsruhe sur ce principe de séparation d'échelles. Peut-être est-ce là une alternative intéressante aux expériences en cours, à condition de pouvoir reproduire cette séparation d'échelles sans paroi interne. Par ailleurs, la valeur optimale de la séparation d'échelles, en terme de puissance minimum à injecter dans l'expérience de Karlsruhe, a été évaluée. Elle conduit à un nombre de cellules caractéristiques deux fois plus petit que celui utilisé dans l'expérience de Karlsruhe, laissant entrevoir une marge possible pour la réalisation d'une expérience de seconde génération.

2.2.3. Géodynamo, méthode numérique dans la sphère, mailles adaptatives et conditions aux limites magnétiques:

E. Dormy (ENS Paris, IPGP) & R. Teyssier (CEA, Paris)

Il est assez remarquable que tous les codes numériques existants pour étudier la géodynamo utilisent des variantes de la même méthode numérique: une décomposition en harmonique sphérique. Ces dernières années, quelques équipes travaillent au développement de nouvelles méthodes. La difficulté principale pour appliquer des techniques plus novatrices réside dans les conditions aux limites magnétiques. Le champ magnétique n'est bien évidemment pas limité au seul noyau fluide, mais se prolonge dans le manteau isolant. Le domaine de calcul peut cependant être borné en exploitant le fait que le champ dérive d'un potentiel dans l'isolant. Cette propriété produit une fermeture immédiate des équations dans l'espace spectral, fermeture qui est à l'origine du succès de ces méthodes. Le problème est beaucoup moins trivial dans l'espace physique. Alexey Isakov a effectué un séjour de recherche post-doctoral dans notre équipe sur ce problème. Nous avons réussi à obtenir le raccordement exact à un champ potentiel (à la troncature numérique près) pour la partie parabolique de l'équation d'induction. Ce travail a été mené en collaboration avec Stéphane Descombes à IENS-Lyon (Isakov, Descombes, Dormy, 2004). Cette approche ouvre la voie pour une variété de méthodes novatrices pour le problème dynamo (Isakov, Dormy, 2005).

Thèses soutenues :

Vincent Morin, «Instabilités et bifurcations associées à la modélisation de la géodynamo», thèse Paris VII, soutenue de 15 décembre 2005.

Étudiants encadrés :

Vincent Morin (thèse), Thomas Lebrat (thèse), Laure Goudard (M2 IPGP), Christophe Gissinger (M2 Paris 6)

Publications :

Morin V., Dormy E. « Dissipation mechanisms for convection in rapidly rotating spheres and the formation of banded structures. », *Physics of Fluids* sous presse.

Teyssier R., Fromang S., Dormy E. (2006) « Kinematic Dynamos using Constrained Transport with High Order Godunov Schemes and Adaptive Mesh Refinement », *Journal of Computational Physics* sous presse.

Isakov A., Descombes S., Dormy E. (2004) « An integro-differential formulation for magnetic

induction in bounded domains: boundary element-finite volume method », *Journal of Computational Physics*, **197**: 540-554.
Morin V., Dormy E. (2004) « Time dependent -convection in Rapidly Rotating Spherical Shells», *Physics of Fluids*, **16**: 1603-1609.

2.2.4. Code MHD en éléments finis :

C. Nore (LIMSI), R. Laguerre (LIMSI), J. Léorat (Obs. Meudon, LUTH) & J.L. Guermond (LIMSI et TAMU, Texas, USA) :

Nous avons développé successivement deux codes décrivant l'évolution du champ électromagnétique dans l'approximation de la MHD, pour un domaine de calcul comportant des interfaces entre un milieu isolant et un milieu conducteur régi par la loi d'Ohm. Le premier code en géométrie cartésienne 2D utilise un algorithme décrivant le champ électromagnétique (E,H) (Guermond *et al.*, 2006), le second code en géométrie cylindrique 3D décrit le champ magnétique en H dans le milieu conducteur et en gradient d'un potentiel magnétique dans le vide (Laguerre *et al.*, 2006 ; Guermond *et al.*, 2006). Il est basé sur une approximation en éléments finis nodaux dans un plan méridien et une décomposition spectrale en azimut et permet de simuler toute configuration à géométrie cylindrique telle qu'un cylindre (in)fini Laguerre *et al.*, 2006), un tore (Guermond *et al.*, 2006), une sphère (Laguerre *et al.*, 2006 ; Guermond *et al.*, 2006). Nous avons validé ce code Maxwell sur des cas de dynamos cinématiques bien référencés. Un code Navier-Stokes basé sur la même décomposition est opérationnel. Le couplage prochain des codes Maxwell et Navier-Stokes ainsi que leur parallélisation nous permettront d'étudier le régime de saturation de la dynamo non linéaire.

Thèses soutenues :

R. Laguerre: « Approximation des équations de la magnétohydrodynamique par éléments finis nodaux : application à l'effet dynamo. », sera soutenue à l'automne 2006.

Étudiants encadrés :

R. Laguerre (M2, 2003), Y. Magnin (M1, 2006).

Collaborations au sein du GDR :

J. L. Guermond (Université du Texas).

Publications :

J. L. Guermond, J. Léorat and C. Nore : A new finite element method for magneto-dynamical problems: two-dimensional results, *Eur. Jour. Mech. B/ Fluids* **22**, pages 555-579 (2006).
R. Laguerre, C. Nore, J. Léorat et J. L. Guermond : Induction effects in isolated axisymmetric conductors using a new finite element method, Proceedings MHD Summer Program, D. Carati and B. Knaepen eds., 2006.
J. L. Guermond, R. Laguerre, J. Léorat et C. Nore : An Interior Penalty Galerkin Method for the MHD equations in heterogeneous domains, soumis à *J. Comp. Physics*, 2006.
R. Laguerre, C. Nore, J. Léorat et J. L. Guermond : Effects of conductivity jumps in the envelope of a kinematic dynamo flow, soumis à *CR Mécanique*, 2006.

Conférences :

Summer MHD Program Bruxelles, 1-15 juillet 2005, R. Laguerre, C. Nore, J. Léorat.
Warwick Turbulence Symposium Joint Workshop and Graduate summer school: Instabilities and Turbulence in MHD flows [26-Jun-2006-Jul], R. Laguerre.
Organisation d'un mini-symposium « Numerical Simulation of MHD flows » à ECCOMAS 2006, Delft, par J. L. Guermond, J. Léorat et C. Nore.

2.2.5. Optimisation de l'expérience VKS

F. Daviaud, A. Chiffaudel, L. Marié, F. Ravelet, (CEA Saclay) J. Léorat (Obs. Meudon, LUTH), C. Nore (LIMSI).

Nous avons utilisé un code de dynamo cinématique écrit par J. Léorat afin d'étudier la capacité à générer un effet dynamo des champs de vitesse créés par différentes turbines et mesurés par LDV dans un dispositif expérimental en eau (cf. partie expérimentale 2.3.3.). L'objectif est de trouver une configuration possédant un seuil atteignable dans l'expérience VKS2 menée au CEA/Cadarache. Nous avons également simulé la réponse de l'écoulement à un champ magnétique extérieur. Nous avons comparé les résultats à ceux obtenus par C. Nore et al et par l'équipe de Dresden (F. Stefani *et al.*).

Thèses soutenues :

L. Marié, « Transport de moment cinétique et de champ magnétique par un écoulement tourbillonnaire turbulent : influence de la rotation », 2003, GIT Saclay
F. Ravelet « Bifurcation globales hydrodynamiques et magnétohydrodynamiques dans un écoulement de von Karman turbulent », 2005, GIT-Saclay.

Etudiants encadrés :

R. Monchoux (Thèse, GIT-Saclay), J. Roy (ECL, 2003)

Publications :

J. Burguete, L. Marié, F. Daviaud and J. Léorat. Homogeneous dynamo: numerical analysis of experimental von Kármán type flows. *Eur. Phys. J. B* **33**, 469 (2003).
F. Ravelet, A. Chiffaudel, F. Daviaud and J. Léorat. Toward an experimental von Kármán dynamo: Numerical studies for an optimized design. *Phys. Fluids* **17**, 117104 (2005).
F. Stefani, M. Xu, G. Gerbeth, F. Ravelet, A. Chiffaudel, F. Daviaud and J. Léorat. Ambivalent effects of added layers on steady kinematic dynamos in cylindrical geometry: application to the VKS experiment. *European Journal of Mechanics B* In press (2006).

2.2.6. Effet de la turbulence sur le seuil de la dynamo et de l'induction.

Y. Ponty (OCA, Nice), H. Politano (OCA, Nice), J.F. Pinton (ENS Lyon), J.P. Laval (Lille), B. Dubrulle (Saclay), F. Daviaud (Saclay)

Nos études portent sur la compréhension de l'effet de la turbulence sur le seuil dynamo. L'approche est numérique, dans une situation assez académique, celle de l'écoulement engendré par le forçage de Taylor-Green. Il est étudié en géométrie périodique par simulations numériques directes ou l'utilisation de schémas de modélisation sous maille, pour tenter de diminuer les nombres de Prandtl magnétiques accessibles. Les principaux résultats obtenus sont:
- en ce qui concerne l'induction en champ appliqué, une modélisation LES permet de comparer

qualitativement et quantitativement les résultats numériques aux mesures en sodium,
- pour ce qui est de la dynamo, le seuil augmente brutalement quand le flot devient turbulent, mais reste ensuite sur un plateau avec une valeur égale à environ 8 fois la valeur laminaire. Le champ magnétique pousse à grande échelle, et tend à réduire l'intensité des fluctuations de vitesse à petite échelle.
- cet effet d'augmentation du seuil est sans doute dû à des fluctuations à grande échelle de la vitesse. En effet, lorsque l'on effectue une simulation où l'on remplace les fluctuations de vitesse par un bruit markovien, d'échelle caractéristique et de temps de corrélation variable, on remarque que seules les fluctuations à grande échelle jouent un rôle. Ce rôle est d'autant plus important que le temps de corrélation augmente, et se rapproche du temps de retournement du champ de vitesse moyen.
- lorsque les fluctuations sont ignorées, et que seul l'écoulement moyenné en temps est considéré, on trouve deux modes dynamo: une branche basse où évolue l'écoulement réel laminaire (à bas Reynolds) et une branche haute, où évolue l'écoulement turbulent. Ces coïncidences pourraient cependant n'être que fortuites, car les déformations des fenêtres dynamo, induites par un bruit markovien, conduisent à un effet similaire.

Étudiants encadrés

Julien Baerenzung (Master 2, 2006), Ph. Michel, (Master 2, 2003), R. Dolganov (Master 2, 2004), P. Blaineau (INSA, 2005), O. Lopez (ENSTA, 2006), R. Jover (Master 1, 2006)

Collaborations au sein du GDR :
A. Pouquet (NCAR, Boulder).

Publications:

Y. Ponty, H. Politano and J.-F. Pinton : Simulation of induction at low magnetic Prandtl number , *Phys. Rev. Lett.*, **92**(14), 144503, (2004).
Y. Ponty, P.D. Minnini, D. Montgomery, J.-F. Pinton, H. Politano, A. Pouquet: Numerical study of dynamo action at low magnetic Prandtl numbers, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 164502 (2005).
P.D. Minnini, Y. Ponty, D. Montgomery, J.-F. Pinton, H. Politano, A. Pouquet~: Nonlinear behavior of a non-helical dynamo, *Astrophys. J.* **626**, 853-863 (2005).
Y. Ponty, P.D. Minnini, J.-F. Pinton, H. Politano, A. Pouquet : Dynamo action at low magnetic Prandtl numbers: mean flow vs. fully turbulent motion, submitted (2006).
J.-P. Laval, P. Blaineau, N. Leprovost , B. Dubrulle and F. Daviaud. Influence of turbulence on the dynamo threshold, *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 204503 (2006).

Conférences :

Aout 2003 : symposium London Mathematical Society (Durham, UK).
26 mai 2003 : Conférence invite pour les nouveaux entrants du SPI (Frejus).
22-23 janvier 2004 : Conférence au COSTP6-Working Group 1 (Paris)
Septembre 2004: An Isaac Newton Institute Workshop Satellite meeting on Stellar Dynamos (Leeds UK.)
7-9 Juin 2006: UK MHD2006 (St Andrews , UK)
24 Juin 2006 : Geophysical Turbulence Program Workshop Modeling Magnetohydrodynamic Turbulence : Application to planetary and stellar dynamos at the National Center for Atmospheric Research (NCAR), Boulder, Colorado USA

26 Juin 2006 Joint Workshop and Graduate Summer School: Instabilities and Turbulence in MHD Flows, Warwick, UK.

2.2.7. Écoulement Couette Sphérique Géostrophique

Ph. Cardin (LGIT, Grenoble), N. Schaeffer (IRPHE, Marseille) , D. Jault (LGIT, Grenoble) & E. Dormy (ENS Paris, IPGP)

Nous avons calculé des dynamos pour un écoulement de Couette sphérique géostrophique. L'écoulement est constitué par le cisaillement entre deux sphères en rotation différentielle instable sous forme d'onde de Rossby. En utilisant une approximation quasi-géostrophique (de plan beta), nous pouvons calculer l'écoulement dans le plan équatorial. Après une extrapolation du champ de vitesse dans la sphère tout entière, nous pouvons calculer l'équation d'induction et déterminer le seuil dynamo. Le passage entre les deux grilles permet de séparer les échelles spatiales et temporelles magnétique et cinématique. Cette approche nous a permis de calculer des dynamos à de très faibles nombres d'Ekman (10^{-8}) et de très faibles nombre de Prandtl magnétique (10^{-3}). En revanche, les nombres de Reynolds magnétique critiques sont trop élevés (1000) pour être atteint expérimentalement.

Thèses soutenues :

N. Gillet, « Magneto-convection dans une sphère en rotation rapide: approches expérimentale et numérique de la convection dans les noyaux planétaires », Octobre 2004, LGIT.
N. Schaeffer, « Instabilités, turbulence et dynamo dans une couche de fluide cisailée en rotation. Importance de l'aspect ondulatoire », Décembre 2004, LGIT.

Publications:

N. Schaeffer and Ph. Cardin, Quasi-geostrophic kinematic dynamos at low magnetic Prandtl number *Earth and Planetary Science Letters*, **245**, 595-604, 2006. <baeren@obs-nice.fr>
N. Schaeffer and Ph. Cardin, Rossby-wave turbulence in a rapidly rotating sphere *Nonlinear Processes in Geophysics* , **12**, 947-953, 2005.
N. Schaeffer and Ph. Cardin, Quasi-geostrophic model of the instabilities of the Stewartson layer in flat and depth varying containers *Physic of Fluids* , **17**, 104111, 2005.
E. Dormy, A. Soward, C. Jones, D. Jault and Ph. Cardin, The onset of thermal convection in rotating spherical shells, *Journal of Fluid Mechanics*, **501**, 43-70, 2004.
J. Aubert, N. Gillet and Ph. Cardin, Quasigeostrophic models of convection in rotating spherical shells, *G-cubed*, **4**, 1052, doi:10.1029/20

2.3. Expériences et mesures

Durant la période 2003-2006, le pôle expérimental du GDR Dynamo a vu se poursuivre des projets expérimentaux existants et vu émerger de nouveaux projets. L'expérience en sodium liquide conduite à Cadarache à travers la collaboration de plusieurs équipes (ENS-Paris, ENS-Lyon, CEA-Saclay, CEA-Cadarache) a évolué durant cette période vers une seconde configuration VKS2. L'expérience DTS conduite à Grenoble (LGIT), également en sodium liquide, a démarré en 2004. D'autres projets expérimentaux avec des métaux liquides tels le gallium, le gallistan ou

le mercure, sont en cours (IRPHE, ENS-Paris, ENS-Lyon, LGIT). Des expériences en eau destinées à préparer des expériences en métaux liquides (CEA-Saclay, IRPHE, LGIT, Observatoire Paris-Meudon) se poursuivent également.

L'instrumentation autour de toutes ces expériences a occupé une part importante dans l'activité des différentes équipes. Un atelier « Instrumentation Sodium » s'est tenu à Grenoble sur deux jours en Décembre 2004 où l'expertise de différentes équipes fut partagée. Une collaboration entre le CEA-Saclay et le LGIT a vu le jour autour des mesures ultrasonores par effet Doppler dans le sodium liquide (expériences conduites à Cadarache en Janvier 2006). Cet effort en instrumentation est capital dans l'optique d'une future expérience dynamo de grande taille. Un contrat Emergence du programme Région Rhône-Alpes est en cours, axé sur l'amélioration des mesures accessibles dans les écoulements de métaux liquides (LGIT, ENS-Lyon, LEGI, Signal-processing).

Nous résumons ci-dessous les activités de chaque groupe durant la période 2003-2006.

2.3.1. Expériences à nombre de Reynolds magnétique > 1

S. Fauve, F. Petrelis, N. Mordant, M. Berhanu (ENS Paris), J.F. Pinton, P. Odier, M. Bourgoïn, R. Volk (ENS Lyon), F. Daviaud, A. Chiffaudel, L. Marié, F. Ravelet, R. Monchaux, C. Gasquet (CEA Saclay), Th. Alboussière, D. Brito, Ph. Cardin, D. Jault, H-C. Nataf, D. Schmitt, N. Gillet, B. Deleplace, N. Gagnières, N. Schaeffer, R. Deguen (Grenoble)

Ces dernières années ont vu la mise en place de la seconde génération des expériences en sodium du groupe VKS (ENS-Paris, ENS-Lyon, CEA-Saclay, CEA-Cadarache), l'expérience VKS2 avec un écoulement de Von Karman en sodium liquide (Marié et al., 2002 ; Pétrélis et al., 2003 ; Volk et al., 2006). Les premières études ont portées sur l'induction:

- réponse à un champ extérieur uniforme, comme dans VKS1: des effets notablement différents de ceux prévus par la géométrie de l'écoulement moyen ont été observés. Les champs induits atteignent des amplitudes colinéaires au champ appliqué plusieurs fois supérieures à ce dernier. Par contre l'auto-entretien dynamo n'a pas été atteint.

- réponse à un champ extérieur très localisé spatialement: ces études concernent le transport par la turbulence d'une source de champ magnétique de faible dimension, permettant de mieux comprendre les relations entre production / transport / diffusion. Les expériences sont menées sur le montage VKS à Cadarache et également au LPS (ENS-Paris) où un écoulement différent est utilisé. Celui-ci est engendré par un ensemble de 4 hélices. En jouant sur leur pas et leur sens de rotation, on peut engendrer un écoulement relativement homogène présentant un très fort taux de turbulence à grande échelle mais aussi un écoulement turbulent avec une forte rotation moyenne. Ce montage a été caractérisé en eau. Les premières expériences utilisant du gallium vont débiter en 2006.

A l'ENS-Lyon, l'expérience VKG (Von Karman Gallium) s'est poursuivie (Bourgoïn et al., 2004a ; Bourgoïn et al., 2004b ; Volk et al., 2006a ; Volk et al. ; 2006b). Deux aspects ont été étudiés successivement. D'abord, la compréhension des effets d'induction engendrés par l'écoulement moyen, et sa description par une approche numérique quasi-statique -- ce fut l'objet de la thèse de M. Bourgoïn. Ensuite, la caractérisation des fluctuations dues à la turbulence, qu'il s'agisse d'effets engendrés à petite échelle (effets alpha et beta) ou de résultats de l'instantanéité des grandes échelles. R. Volk a développé ces aspects pendant sa thèse. En ce qui concerne la

génération d'une dynamo homogène, la leçon de ces études est que, si l'écoulement moyen de Von Karman convient, ses fluctuations temporelles à grande échelle pourraient se révéler très nuisibles.

Le principal travail expérimental du LGIT à Grenoble lors de cette période 2003-2006 a consisté à mettre en œuvre une expérience de Couette sphérique utilisant 50 litres de sodium liquide: DTS (Derviche Tourneur Sodium). L'originalité de cette installation réside dans son aspiration à modéliser des écoulements en rotation rapide en présence d'un champ magnétique dipolaire imposé assez fort pour influencer la dynamique. Les premiers résultats datent de janvier 2005.

Les mesures des couples moteurs montrent que, du fait des contraintes apportées par la rotation et le champ magnétique, la turbulence et la dissipation associée sont très réduites. Des nombres de Reynolds magnétique supérieurs à 25 sont atteints avec seulement 4 kW de puissance. L'écoulement axisymétrique moyen a été caractérisé (Nataf et al., 2006): le champ magnétique induit révèle un écoulement méridional important et gouverné par la force de Coriolis; les mesures de vitesse par effet Doppler ultrasonore confortent ce résultat et révèlent de fortes fluctuations dans le plan de l'équateur; les potentiels électriques indiquent que les vitesses angulaires dans le sodium sont supérieures à celles de la sphère et de la graine: il s'agit du phénomène de super-rotation expliqué par Dormy *et al.* en 1998.

Thèses soutenues :

L. Marié, « Transport de moment cinétique et de champ magnétique par un écoulement tourbillonnaire turbulent : influence de la rotation », 2003, GIT Saclay

F. Ravelet « Bifurcation globales hydrodynamiques et magnétohydrodynamiques dans un écoulement de von Karman turbulent », 2005, GIT-Saclay.

R. Volk, « Fluctuations d'induction en magnétohydrodynamique, contributions à l'induction à grande échelle, application à l'effet dynamo », 2005, ENS-Lyon.

Etudiants encadrés :

M. Berhanu (Thèse, ENS Paris), R. Deguen (Thèse, LGIT), N. Gagnière (Thèse, LGIT), R. Monchaux (Thèse, GIT-Saclay).

Collaborations au sein du GDR :

E. Falgarone, M. Pérault (LRA, ENS), M. Bourgoïn, F. Plunian (LEGI).

Publications:

L. Marié, F. Pétrélis, M. Bourgoïn, J. Burguete, A. Chiffaudel, F. Daviaud, S. Fauve, P. Odier, J.-F. Pinton, Open questions about homogeneous fluid dynamos; the VKS experiment, *Magnetohydrodynamics*, **38**, 163-176, (2002).

F. Pétrélis, M. Bourgoïn, L. Marié, A. Chiffaudel, S. Fauve, F. Daviaud, P. Odier and J.-F. Pinton: Non linear induction in a swirling flow of liquid sodium, *Phys. Rev. Lett.*, **90**, 17, 174501, (2003).

R. Volk, F. Ravelet, A. Chiffaudel, F. Daviaud, B. Dubrulle, S. Fauve, N. Mordant, Ph. Odier, F. Pétrélis and J.-F. Pinton, Transport of magnetic field by a turbulent flow of liquid sodium, submitted to *Phys. Rev. Lett.* March, 2006.

M. Bourgoïn, P. Odier, J.-F. Pinton and Y. Ricard: An iterative study of time independent induction effects in magnetohydrodynamics, *Phys. Fluids*, **16** (7), 2529--2547, (2004).

M. Bourgoin, R. Volk, P. Frick, S. Kripechenko, P. Odier, J.-F. Pinton : Induction mechanisms in von Karman swirling flows of liquid Gallium, *Magnetohydrodynamics*, **40**(1), 3-21, (2004b).
 R. Volk, R. Stepanov, S. Denisov, P. Frick, V. Noskov, J.-F. Pinton, Induction, helicity and alpha effect in a toroidal screw flow of liquid gallium, *Phys. Rev. E* **73**, 1 (2006a).
 R. Volk, P. Odier, J.-F. Pinton, Fluctuation of magnetic induction in von Karman swirling flows, to appear in *Phys. Fluids*, (2006) .
 H.-C. Nataf, T. Alboussière, D. Brito, P. Cardin, N. Gagnière (LGIT), D. Jault (LGIT), J.-P. Masson, D. Schmitt , Experimental study of super-rotation in a magnetostrophic spherical Couette flow, Accepted *Geoph. Astrophys. Fluid Dyn.* (2006).

2.3.2. Expériences à nombre de Reynolds magnétiques < 1

S. Fauve, F. Pétrélis, S. Aumaître (ENS Paris), D. Brito, D. Jault, H.-C. Nataf, N. Gillet (Grenoble)

L'étude de la convection thermique dans le mercure (Aumaître et Fauve, 2003; Aumaître *et al.*, 2006) a été entreprise au LPS à l'ENS-Paris. Le flux de chaleur moyen transporté par un écoulement convectif turbulent, en particulier dans un métal liquide, a fait l'objet de nombreux travaux expérimentaux et théoriques. Il n'existait par contre aucune études relatives aux fluctuations du flux de chaleur: comportement de l'écart-type des fluctuations relativement au flux moyen à grand nombre de Rayleigh, Ra, loi de probabilité des fluctuations, etc. Il a été observé que l'écart-type des fluctuations du flux de chaleur est proportionnel à la différence de température engendrant la convection et il croît donc moins vite avec Ra que le flux moyen. Ceci peut être compris comme résultant de la loi des grands nombres à condition de supposer que la longueur de corrélation pertinente est l'épaisseur de la couche limite thermique. Par contre, le poids des événements rares sur l'asymétrie de la distribution de probabilité augmente avec Ra. L'effet d'un champ magnétique horizontal d'amplitude suffisante est de supprimer les fluctuations du flux de chaleur tout en n'affectant pratiquement pas sa valeur moyenne.

L'étude de l'effet d'un bruit sur le seuil d'une instabilité (Pétrélis et Aumaître, 2003; Pétrélis *et al.*, 2005) est cours aussi au LPS: la préparation d'une expérience de dynamo turbulente nécessite de comprendre et d'estimer l'effet des fluctuations turbulentes sur le seuil de l'instabilité dynamo. Il a été effectué un ensemble de travaux expérimentaux et théoriques à cet effet. En particulier, des expériences ont été réalisées sur d'autres instabilités hydrodynamiques afin de comprendre l'effet d'un bruit multiplicatif. Il a été montré que ces instabilités peuvent être fortement inhibées lorsque leurs paramètres de contrôle sont bruités. En plus de l'augmentation du seuil d'instabilité qui en résulte, la nature de l'instabilité peut être changée. Un scénario usuel est que le mode instable apparaisse sous forme de bouffées intermittentes. Il a été observé que ce phénomène est contrôlé par le spectre de bruit à fréquence nulle et non par l'intensité du bruit.

Au LGIT, l'étude de l'ajout d'un champ magnétique toroïdal dans une expérience de convection thermique en gallium liquide développée précédemment fut menée (Gillet *et al.*, 2006 a, b). L'étude expérimentale, appuyée par des simulations numériques quasi-géostrophiques 3D, montre une stabilisation de la convection développée et une modification de la géométrie des cellules en présence de champ magnétique faible. Cette évolution est, d'une part, la conséquence de l'évolution du seuil d'instabilité avec le champ imposé et, d'autre part, la conséquence de

l'anisotropie induite par le champ magnétique, le fluide privilégiant un déplacement le long des lignes de champ magnétique.

Thèses soutenues :

N. Gillet, « Magneto-convection dans une sphère en rotation rapide: approches expérimentale et numérique de la convection dans les noyaux planétaires », Octobre 2004, LGIT.

Etudiants encadrés :

M. Berhanu (Thèse, ENS Paris), R. Deguen (Thèse, LGIT), N. Gagnière (Thèse, LGIT).

Publications:

S. Aumaître and S. Fauve, Statistical properties of the fluctuations of the heat transfer in turbulent convection", *Europhys. Letters* **62**, 822-828 (2003).

S. Aumaître, F. Pétrélis and S. Fauve, Effect of a magnetic field on heat transport in turbulent convection (soumis à *Phys. Rev. E*, 2006).

F. Pétrélis, S. Aumaître , Intermittency at the edge of a stochastically inhibited pattern-forming instability, *Eur. Phys. J. B* **34**, 281-284 (2003).

F. Pétrélis, S. Aumaître and S. Fauve, Effects of phase noise on the Farady instability, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 070603 (2005).

Nataf, H.-C., Dynamo and convection experiments. In A. S. C.A. Jones et K. Zhang (Eds.), *Earth's core and lower mantle*, pp. 153-179. Taylor and Francis, 2003.

N. Gillet, D. Brito, D. Jault, H.-C. Nataf, Experimental and numerical studies of convection in a rapidly rotating spherical shell, en revision, *JFM*, 2006a.

N. Gillet, D. Brito, D. Jault, H.-C. Nataf, Experimental and numerical studies of magneto-convection in a rapidly rotating spherical shell, en revision, *JFM*, 2006b.

2.3.3. Expériences en eau

F. Daviaud, A. Chiffaudel, L. Marié, F. Ravelet, R. Monchaux, C. Gasquet (CEA Saclay), J. Léorat (Meudon), P. Legal, M. Lebars, L. Lacaze, S. Ledizes (Marseille), D. Brito, Ph. Cardin, D. Jault, D. Schmitt, B. Deleplace (Grenoble)

Le Groupe Instabilité et Turbulence (GIT) de Saclay étudie l'écoulement cisaillé de Von Karman turbulent à très haut nombre de Reynolds (Burguete et al., 2003; Ravelet *et al.*, 2005; Stefani *et al.*, 2006) . Ces études expérimentales sont préalables à l'étude de ce même écoulement dans le sodium liquide en vue d'observer l'effet dynamo (Expérience VKS) et la MHD à grand nombre de Reynolds. Elles contribuent fortement à la réflexion sur le rôle de la turbulence, en tant que tel et en liaison avec l'effet dynamo. Des mesures de vélocimétrie Laser Doppler et PIV offrent une bonne compréhension de cet écoulement, à savoir sa structure moyennée dans le temps et les propriétés de la turbulence aux différentes échelles.

Les observations du champ de vitesse moyen sont couplées intimement à des études numériques de dynamo cinématique (collaboration avec J. Léorat de l'observatoire de Paris avec Stefani, Gerbeth, Xu de l'équipe de Dresde, avec C. Nore au LIMSI sur l'étude numérique de l'induction par les champs de vitesse expérimentaux). Ces simulations du champ magnétique potentiellement produit par le champ de vitesse permettent de choisir et d'optimiser les écoulements à tester dans le sodium liquide (VKS), et de comprendre la structure des champs magnétiques attendus.

Le groupe travaille aussi, en lien avec le LGIT de Grenoble, à la réalisation et à la calibration de mesures de vitesse par vélocimétrie ultrasonore dans le sodium liquide. Des mesures quantitatives ont été réalisées et comparées aux mesures dans l'eau et de nouveaux traceurs d'écoulement ont été proposés et testés.

A l'Observatoire de Paris, un écoulement en précession est testé. Le forçage d'un écoulement par précession présente a priori des avantages physiques et pratiques (forçage direct à grand échelle sans parois ou turbines internes), qu'il faut confirmer par une étude détaillée. Celle-ci est en cours à l'aide d'un équipement adapté (expérience ATER, utilisant un réservoir cylindrique et de l'eau comme fluide). Pour obtenir des mesures du champ de vitesse dans des sections droites ou un plan contenant l'axe du réservoir, un équipement de vélocimétrie par image de particules (PIV) embarqué a été réalisé. La PIV doit permettre de caractériser les grandes échelles de l'écoulement, qui sont influencées par la rotation, et qui sont aussi déterminantes pour l'effet dynamo.

Le réservoir en précession peut être considéré comme un résonateur d'ondes inertielles forcées en volume par la précession, avec un écoulement laminaire lorsque le forçage est inférieur à un taux de précession critique dépendant de l'allongement du réservoir. Le programme scientifique proposé a ainsi des perspectives d'interactions étroites avec des approches numériques et théoriques de ce type de forçage. Comme le régime turbulent semble remplir le réservoir de façon quasi-homogène, l'étude expérimentale de ce régime apportera aussi une contribution originale à un domaine mal connu bien que fondamental en astrophysique: la turbulence développée dans les fluides (non conducteurs) en rotation.

L'équipe « Ecoulements tournant et géophysiques » de l'IRPHE à Marseille a poursuivi son activité expérimentale en eau et en gallium. Le phénomène de convection thermo-solutale semble aujourd'hui le mieux placé pour fournir l'énergie à la dynamo terrestre. Toutefois, des instabilités de type inertiel dues à la précession ou à la déformation elliptique du noyau de la Terre par des effets de marée pourraient fort bien intervenir dans la dynamique du noyau liquide, voire même constituer la source d'énergie principale de la génération ou de l'induction d'un champ magnétique dans d'autres planètes (par exemple sur Io ou Ganymède, satellites de Jupiter). Instabilité de précession et instabilité elliptique proviennent du même mécanisme physique. Lorsqu'un fluide est en rotation solide, des modes oscillants, appelés ondes inertielles ou modes de Kelvin, peuvent se superposer à l'écoulement de base. Un forçage paramétrique engendré par le champ de contraintes elliptique peut faire résonner certaines des ondes inertielles et la structure de l'écoulement change alors radicalement. Faisant suite à des études en géométrie cylindrique, des expériences dans une sphère déformable et mise en rotation, ainsi qu'une analyse théorique de l'instabilité elliptique en géométrie sphérique, ont permis de vérifier l'apparition d'un mode instable dit de « spin-over », qui force le fluide à tourner suivant un axe perpendiculaire à l'axe d'entraînement (Lacaze *et al.*, 2004). Il a ensuite été ajouté au système une « graine » solide: les analyses expérimentales et théoriques de l'instabilité ont alors montré la persistance du spin-over dans la coquille sphérique (Lacaze *et al.*, 2005). Finalement, la réponse de l'écoulement à un champ magnétique imposé fut étudié: un champ magnétique relativement faible de 20 Gauss a été créé parallèlement à l'axe d'entraînement par deux bobines d'Helmholtz, et un gaussmètre à sondes à effet Hall a permis de mesurer la croissance du champ magnétique induit par le mode de spin-over excité dans un eutectique de Gallium-Indium-Etain (Galinstan), liquide à température ambiante (Le Gal *et al.*, 2005 ; Lacaze *et al.*, 2006) (Programme national INSU de

Planétologie; Champs magnétiques induits par les instabilités de marée: application aux satellites Galliléens). Collaboration entreprise en 2006 avec J. Aubert du laboratoire de dynamique des systèmes géologiques de l'IPGP. Récemment, une étude de l'interaction entre convection et instabilité inertielle a également débuté (Le Bars et Le Dizès, 2006)

Au LGIT, une approche expérimentale de la turbulence a été effectuée par des mesures de la viscosité apparente dans des fluides en rotation (Brito *et al.*, 2004). Les mécanismes de forçage ainsi que la géométrie du récipient contribuent fortement à la modification de viscosité observée. Par ailleurs, d'autres développements expérimentaux ont été menés dans le but de valider certaines simulations numériques (Noir *et al.*, 2003). L'étude des instabilités d'une couche de cisaillement a ainsi montré que la pente du récipient est le paramètre clé de l'instabilité, qui prend la forme d'ondes de Rossby.

Thèses soutenues:

B. Deleplace, « Approche expérimentale de la turbulence par mesures de viscosité apparente dans les fluides en rotation ; Application au couplage visco-magnétique de l'interface noyau-manteau », Octobre 2005, LGIT .

L. Lacaze, « L'instabilité elliptique : exemples en aéronautique et en géophysique » Décembre 2004, IRPHE.

L. Marié, « Transport de moment cinétique et de champ magnétique par un écoulement tourbillonnaire turbulent : influence de la rotation », 2003, GIT Saclay

F. Ravelet « Bifurcation globales hydrodynamiques et magnétohydrodynamiques dans un écoulement de von Karman turbulent », 2005, GIT-Saclay.

Etudiants encadrés :

M. Berhanu (Thèse, ENS Paris), R. Deguen (Thèse, LGIT), N. Gagnière (Thèse, LGIT), R. Monchaux (Thèse, GIT-Saclay), D. Ericher (CEFIPA, 2003), F.X. Vandernoot (Master 1, 2003), A. Guet (Licence 3, 2004), S. Louvard (Master 1, 2004), J. Palacci (ENS Lyon, 2004), L. Tang (Master 1, 2005), B. Monegier du Sorbier (Licence 3, 2005), V. Temperlé (Master 1, 2006), M. Wartelski (ENPC, 2006)

Publications :

J. Burguete, L. Marié, F. Daviaud and J. Léorat. Homogeneous dynamo: numerical analysis of experimental von Kármán type flows. *Eur. Phys. J. B* **33**, 469 (2003).

F. Ravelet, A. Chiffaudel, F. Daviaud and J. Léorat. Toward an experimental von Kármán dynamo: Numerical studies for an optimized design. *Phys. Fluids* **17**, 117104 (2005).

F. Stefani, M. Xu, G. Gerbeth, F. Ravelet, A. Chiffaudel, F. Daviaud and J. Léorat. Ambivalent effects of added layers on steady kinematic dynamos in cylindrical geometry: application to the VKS experiment. *European Journal of Mechanics B* In press (2006).

Lacaze L., Herreman W., Le Bars M., Le Dizès S. and Le Gal P., Magnetic field induced by elliptical instability in a rotating spheroid. Accepted *Geoph. Astrophys.Fluid Dyn.* (2006).

Lacaze L., Le Gal P. and Le Dizès S., Elliptical instability in a rotating spheroid. *J. Fluid Mech.* **505** (2004), p. 1-22.

Lacaze L., Le Gal P. and Le Dizès S., Elliptical instability in a rotating shell, *Phys. Earth. Plan. Int.*, **151** (2005) , p.194-205.

Le Gal P., Lacaze L., and Le Dizès S., Magnetic field induced by elliptical instability in a rotating tidally distorted sphere. *J. Phys. Conf. Ser.* **14** (2005), p.30-34.

Le Bars M. and Le Dizès S., Thermo-elliptical instability in a rotating cylindrical shell. En révision (2006).

Brito, D., J. Aurnou, et P. Cardin (2004). Turbulent viscosity measurements relevant to planetary core-mantle dynamics. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **141**, 3-8.

Noir, J., P. Cardin, D. Jault, et J.-P. Masson (2003). Experimental evidence of non-linear resonance effects between retrograde precession and the tilt-over mode within a spheroid. *Geophysical Journal International* **154**, 407-416.

Schmitt, D. et D. Jault (2004). Numerical study of a rotating fluid in a spheroidal container. *Journal of Computational Physics* **197**, 671-685.

2.4. Magnétohydrodynamique et effet dynamo dans les milieux naturels

Le champ magnétique, comme la rotation, est omniprésente dans les objets célestes (planètes, étoiles, milieu interstellaire, galaxies, ...). En comprendre son origine et son influence sur l'évolution et la dynamique des objets cosmiques est crucial. L'effet dynamo représente certainement un des processus physiques incontournables pour expliquer la présence de champ magnétique dans l'univers. Le caractère « universel » de l'effet dynamo permet aux théoriciens et modélisateurs des différents objets célestes de comparer leur approche et ainsi progresser dans la description précise de ce processus. Le GDR Dynamo a ainsi permis de rassembler une large et diverse communauté française autour de problèmes clés concernant l'effet dynamo dans les objets cosmiques. Nous présentons ici les récents progrès réalisés dans le cadre du GDR par les différents groupes impliqués.

2.4.1. Géodynamo:

Effet alpha généré par des ondes de Rossby à très petit nombre d'Ekman

R. Avalos-Zuñiga, F. Plunian (LEGI).

Les ondes de Rossby présentes dans le noyau terrestre sont susceptibles de générer un effet alpha qui, avec la rotation différentielle, constituerait le mécanisme principal de la Géodynamo. C'est d'ailleurs une des raisons qui a motivé la construction de l'expérience DTS. Toutefois la géométrie de l'écoulement dépend du nombre d'Ekman. Si celui-ci est excessivement petit dans le cas terrestre et DTS, la plupart des simulations numériques en revanche, fonctionnent à Ekman modéré en raison des performances limitées des ordinateurs. Avec R. Avalos-Zuñiga et K.-H. Rädler, nous avons montré que l'effet alpha généré à Ekman modéré est fondamentalement différent de celui généré à très petit nombre d'Ekman. En particulier, le déplacement des ondes est une caractéristique essentielle au mécanisme dynamo à très petit nombre d'Ekman sans lequel l'effet alpha serait nul. Par conséquent il semble encore prématuré d'extrapoler les résultats des simulations numériques à la Géodynamo.

Thèse soutenue :

Quelques études théoriques relatives aux dynamos expérimentales, R. Avalos-Zuñiga (2005).

Collaborations au sein du GDR :

Ph. Cardin, N. Schaeffer (LGIT).

Publications:

Avalos-Zuñiga, R., Plunian, F., Rädler, K.-H., Rossby waves and alpha-effect, soumis (2006).

Conférences :

Avalos-Zuñiga, R., Plunian, F., Rädler, K. H., Mean electromotive force for a ring of helical vortices, Proc. 21th Congrès IUTAM, Varsovie, Pologne (2004).

Avalos-Zuñiga, R., Plunian, F., Rädler, K. H., Vortex dynamics and field interactions (Euromech Colloquium 448), Paris, France (2004).

Etude du champ magnétique terrestre

E. Dormy (IPG et LPS, Paris)

L'interaction des modélisateurs avec les observateurs est évidemment importante pour l'étude de ce problème. Les connaissances sur le champ magnétique terrestre et sa variabilité temporelle ont considérablement progressé ces dernières années. En collaboration avec Mioara Manda, nous avons effectué une étude visant à mieux comprendre les variations rapides des pôles géomagnétiques et ce qu'ils nous apprennent sur la dynamique du noyau fluide. Nous avons en particulier montré que l'accélération du mouvement du pôle nord géomagnétique ne devait pas être considéré comme l'indication de l'approche d'une inversion de polarité (Manda et Dormy, 2003). Dans un autre travail (Dormy, Manda, 2005) nous nous sommes intéressés aux secousses géomagnétiques (« jerks ») et nous avons essayé de rapprocher les observations des contraintes théoriques sur les différentes ondes magnétohydrodynamiques susceptibles de se propager dans le noyau liquide terrestre.

Publications :

Dormy E., Manda M. (2005) « Tracking geomagnetic Impulses at the core-mantle boundary », *Earth and Planetary Science Letters*, **237** : 300309.

Manda M., Dormy E. (2003) « Asymmetric behavior of magnetic dip-poles », *Earth Planets Space*, **55** : 139-151.

2.4.2. Soleil-Étoiles:

Modèle 3-D MHD de la dynamo dans la zone convective solaire

S. Brun (SAP, Saclay)

Nous avons calculé en géométrie sphérique des simulations à haute résolution ($>500^3$) pour étudier l'effet dynamo dans un modèle simplifié du soleil incluant de façon auto consistante la convection, la rotation et le champ magnétique. Nous trouvons qu'un nombre de Reynolds magnétique $Rm > 300$ permet d'avoir un effet dynamo et que ME/KE sature vers ~10% dans notre cas le plus turbulent ($Rm \sim 500$). Le champ B est très non axisymétrique (~98% de ME) et le champ moyen (axisymétrique $m=0$) faible. Nous trouvons des renversements du champ mais trop rapides (~500 jours) et irréguliers, confirmant les résultats à faible résolution de Gilman et Glatzmaier dans les années 80. Nous pensons que l'inclusion d'une zone stable en dessous de la

zone convective et d'une tachocline (la zone de fort cisaillement découverte par l'héliosismologie) permettra d'améliorer les modèles (travail en cours semble confirmer notre intuition).

Publications :

Brun, A.S. "Convection, Turbulence, Rotation et Champ Magnétique dans les Etoiles", Habilitation à diriger les Recherches, Université de Paris 7, 2005
Brun, A. S., Miesch, M. S. and Toomre, J. 2004, "Global-scale Turbulent Convection and Dynamo Action in the Solar Envelope", *ApJ*, **614**, 1073-1098.
Brun, A. S., 2004, "On the Interaction between Differential Rotation and Magnetic Fields in the Sun", *Solar Physics*, **220**, 333-344.
Brun, A.S., *Clés du CEA* no 49
Brun, A.S., *La Recherche*, n°393, janvier 2006

Conférences :

Brun, A.S. 2005, "A Turbulent Magnetic Sun", in "The Dynamic Sun: challenges for Theory and Observations", SPM11 meeting, held in Leuven, ESA SP-600, sous presse
Brun, A. S. 2004, "3-D MHD Simulations of the Solar Convection Zone and Tachocline", in Helio- and Asteroseismology: Towards a Golden Future, SOHO14/GONG04 Conference held in Yale, July 12-17, ESA SP-559, 271-282
Brun, A. S. 2003, "On Stellar Dynamo Processes and Differential Rotation", in Workshop Magnetism and Activity of the Sun and Stars, eds J. Arnaud & N. Meunier, EAS Publication Series, 9, 179.
Brun, A. S. and Toomre, J. 2003, "Solar Turbulence and Magnetism Studied Within a Rotating Convective Spherical Shell", in 3D Stellar Rotation, eds S. Turcotte, S. C. Keller & R. M. Cavallo, *ASP Conference Series*, **293**, 134-146.

Modèle 3-D MHD de dynamo dans les étoiles massives

S. Brun (SAP, Saclay)

Pour mieux comprendre la relation Soleil-étoile et le magnétisme stellaire, nous avons calculé des modèles du cœur convectif + l'enveloppe radiative d'étoiles de 2 masses solaires avec un taux de rotation Omega variant entre 1/10 solaire et 8 fois solaire. Nous trouvons que les cœurs convectifs sont très efficaces à exciter une dynamo. ME/KE croît avec Omega pour atteindre l'équipartition voire une super équipartition (ME > KE).

Nous avons commencé à étudier l'interaction du champ dynamo avec un champ fossile dans l'enveloppe radiative.

Publications:

Browning, M., Brun, A. S. and Toomre, J. 2004, "Simulations of Core Convection in Rotating A-type Stars: Differential Rotation and Overshooting", *ApJ*, **601**, 512-529.
Brun, A. S., Browning, M. K. and Toomre, J. 2005, "Simulations of Core Convection in Rotating A-type Stars: Magnetic Dynamo Action", *ApJ*, **629**, 461-481.

Conférences :

Brun, A.S. 2005, "On The Coupled Influence of Rotation and Magnetism in convective Core of A-type Stars", in "Element Stratification in Stars: 40 years of Atomic diffusion", held in MONS, eds G. Alecian, O. Richer et S. Vauclair, EAS Publication Series, 17, 203
Brun, A. S. 2004, "Turbulent Convection and Dynamo Action in A- and G-Type Stars", in Semaine de l'Astrophysique Française (SF2A04), 207-211

Modèle 3-D MHD de Soleils jeunes tournant rapidement

S. Brun, S. Turck-Chièze (SAP, Saclay)

Pour mieux comprendre la relation Soleil-étoile et le magnétisme très intense des jeunes étoiles, nous avons calculé des modèles de Soleil jeunes à 10 Mars, avec un taux de rotation Omega variant entre 1 fois solaire et 5 fois solaire. Nous trouvons également que la rotation facilite un champ intense, mais aussi une forte intermittence spatiale et temporelle dans les cas sans champ magnétique. L'ajout de champ magnétique semble stabiliser les simulations.

Conférences :

Ballot, J., Brun, A. S. and Turck-Chièze, S. 2004, "Turbulent Convection in Young Solar-like Stars: Influence of Rotation", in Semaine de l'Astrophysique Française (SF2A04), 197-201
Brown, B., Browning, M. K., Brun, A.S. and Toomre, J. 2004, "Differential Rotation When the Sun Spun Faster", in Helio- and Asteroseismology: Towards a Golden Future, SOHO14/GONG04 Conference held in Yale, July 12-17, ESA SP-559, 341-344

Modèle 3-D MHD de la tachocline solaire

S. Brun (SAP, Saclay), J-P. Zahn (Observatoire de Paris)

Nous avons testé la proposition de Gough & McIntyre 1998, qu'un champ magnétique fossile dans l'intérieur radiatif solaire est suffisant pour confiner la tachocline à une épaisseur < 0.05 Rsol. Nous trouvons que le processus ne marche pas bien, car les lignes de champs poloidales connectent avec le cisaillement en latitude (rotation différentielle) de la zone convective et communiquent via la loi de Ferraro d'isorotation la rotation différentielle dans tout l'intérieur radiatif (avec une prédominance aux moyennes et hautes latitudes), invalidant ainsi le modèle de GM98. Nous confirmons (par un calcul non linéaire 3D) l'existence d'instabilité non axisymétrique du champ poloidal et m=1 des structures toroidales formées par effet omega dans l'intérieur anticipées par Tayler dans les années 70 et 80. Nous comptons étudier plus en détails ces instabilités et l'influence de la rotation et du cisaillement sur leur développement ou saturation.

Publications :

Brun, A. S. & Zahn, J.-P. 2006, "Magnetic Confinement of the Solar Tachocline", A&A sous presse

2.4.3. Développements numériques :

Le code spectral ASH a été fortement développé ces 3 dernières années tant sur le plan numérique (traitement sous maille, nouveau jeu d'équations pour les zones stables radiatives, conditions aux limites), que du point de vue de la physique (nouvelles initialisation, tube de flux twisté ou non, champ multipolaire axi ou non axisymétriques, sortie de nouveaux diagnostics,

etc...). Ce code tourne sur les machines les plus puissantes en France, en Europe (dans le cadre du projet européen en calculs extrêmes DEISA) et aux USA. Il a tourné sur plus de 2000 processeurs, et est certainement un des codes les plus performants actuellement.

A.S. Brun est actuellement PI du projet DEISA européen STARS (Simulation de la Turbulence, de l'Activité et de la Rotation des étoiles) et calcule en Allemagne. Le projet fait parti des 15 premiers projets européens pionniers en calculs extrêmes. A.S. Brun a participé aux réunions au niveau national et européen de définition de la politique européenne en calcul scientifique en préparation du 7ème PCRD. (Voir la lettre de l'IDRIS no7 ainsi que le site DEISA et le rapport Sartorius.)

Nous avons aussi avec mon étudiante en thèse, L. Jouve adapté et développé un code 2-D axisymétrique utilisant la méthode des éléments finis STELEM (stellar element), résolvant l'équation d'induction dans l'approximation (fosa) champ moyen, pour étudier la dynamo solaire. Nous avons entre autre regardé l'influence de la circulation méridienne et du nombre de cellules par hémisphère sur la période du cycle et la parité du diagramme papillon. Nous trouvons que le nombre de cellules en rayon ralenti fortement le cycle. Des évidences observationnelles (Haber et al. 2002) semble effectivement indiquer que le Soleil pourrait subir des épisodes ou sa circulation de surface change fortement (il est encore trop difficile de déterminer par méthode d'héliosismologie locale la forme de la circulation plus profondément dans la Soleil), ce qui aurait des conséquences importantes sur son activité.

Nous participons également à un benchmark international sur la dynamo champ moyen solaire (benchmark lancé à partir d'une réunion au ISSI de Bern), afin de développer un modèle alpha-omega ainsi qu'un modèle de transport de flux (à la Babcock-Leighton) de référence pour la communauté solaire/stellaire.

Etudiants encadrés :

L. Jouve (Thèse).

Publications :

Arit, Brun, Dikpati, Jouve et al. en préparation.

Conférences :

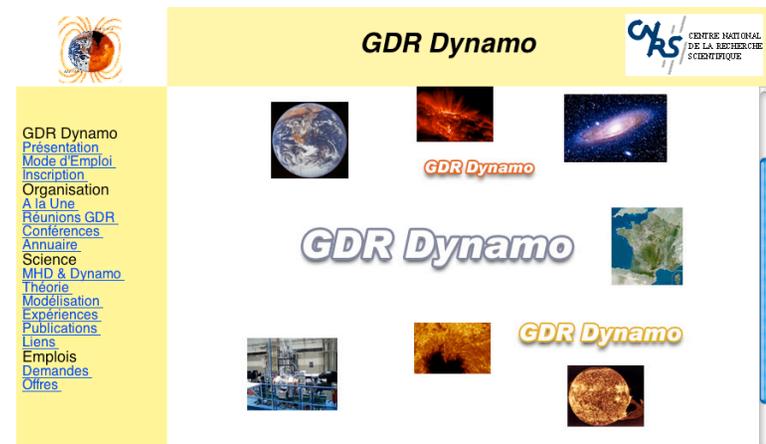
Jouve, L. and Brun, A.S. 2005, "The Influence of Multicellular Meridional Flows in Setting the Cycle Period in Solar Dynamo Models", in Semaine de l'Astrophysique Française (SF2A05), 763

3. ANIMATION SCIENTIFIQUE

La mission confiée au GDR est d'organiser la recherche en France autour des thèmes liés à la dynamo et à la magnétohydrodynamique et de faire émerger une implication de la communauté concernée au niveau européen.

Dans ce cadre, le GDR a organisé cinq réunions générales rassemblant la communauté française, participé à deux réunions au niveau européen, soutenu six colloques sur des thèmes intéressant le GDR, contribué à trois demandes au niveau européen et incité et soutenu les collaborations entre les équipes françaises. La collecte et la diffusion d'informations liées aux thèmes du GDR (colloques, offres et demandes de stages, thèses, post-doc) se fait via un site WEB, d'adresse:

<http://www.obs-nice.fr/gdrdynamo>



3.1. Organisation des réunions générales

Afin de favoriser les échanges entre les différentes équipes, l'organisation de la réunion générale annuelle est confiée successivement aux différentes équipes du GDR, qui sont libres de choisir les thèmes abordés. La première réunion a eu lieu à Saclay les 12-13 juin 2003 et a regroupé 37 membres du GDR. La seconde eut lieu à Nice, les 4 et 5 mai 2004, juste avant la réunion du UK MHD (équivalent anglais du GDR Dynamo), ceci afin de favoriser les couplages avec les chercheurs anglais. Elle a regroupé 39 membres du GDR. La troisième réunion a eu lieu à Grenoble du 21 au 23 mars 2005. Elle a regroupé 40 membres. La quatrième réunion a eu lieu à Lyon les 27 et 28 mars 2006. Elle a regroupé 53 membres. Une dernière réunion est prévue à Nice du 6 au 9 novembre 2006. Il s'agira d'une réunion conjointe avec le GDR turbulence, pour favoriser les échanges entre les deux communautés.

Les programmes sont donnés en annexe B.

3.2. Organisation de réunions à l'échelle européenne

Le GDR a participé à l'organisation de deux réunions mêlant membres du GDR et participants européens sur le thème de la dynamo et de la magnétohydrodynamique.

La première eut lieu à Paris, les 22 et 23 janvier 2004 et fut financée conjointement avec le programme européen "COST". Elle a rassemblé 21 participants français, et 14 européens. Cette réunion a regroupé l'ensemble des laboratoires européens travaillant sur l'effet dynamo. Elle a permis d'effectuer une revue scientifique des différents axes de recherche, et de discuter des actions européennes qui pourraient être entreprises sur ce sujet.

La deuxième eut lieu à Nice les 6 et 7 mai, et fut financée conjointement avec le UK MHD. Elle a rassemblé 25 participants français et 52 étrangers, anglais pour la plupart. Cette réunion a permis aux étudiants des deux communautés de se connaître.

3.3. Demandes européennes

Le GDR soutient et a soutenu l'implication de certains de ses membres dans deux demandes de projets européens ainsi que dans le projet franco-letton Ampère.

3.3.1. FP6 Infrastructures - Design Studies: EMPEDI, coordinateur: J. Freibergs (Lettonie)

Cet appel d'offre concerne la construction d'une plate-forme européenne pour l'étude de la dynamo en utilisant le sodium, en soutien au projet AMPERE. 2 équipes du GDR ont participé à cet appel d'offre: la collaboration VKS (CEA Saclay, ENS Paris et Lyon) et une collaboration grenobloise (LGIT/LEGI/Observatoire de Meudon).

Cette proposition a passé le premier seuil d'évaluation, mais n'a pas fini assez bien classée pour être financée.

3.3.2. FP6 Coordination action : DYNECOR

En 2004, le GdR a mandaté H-C Nataf (LGIT, Grenoble) pour monter un projet européen dans le cadre de l'appel d'offres « Infrastructures » du Programme Cadre 6 de l'Union Européenne. Le projet DYNECOR qui réunissait 25 équipes de recherche, rassemblant 240 chercheurs de 12 pays, a été soumis en mars 2005. Comme dans le GdR dynamo, toutes les disciplines impliquées dans la recherche sur la dynamo étaient présentes (mathématiques, physique, astrophysique, géophysique, sciences de l'ingénieur). Les quatre principaux objectifs étaient :

1. Promouvoir une culture européenne commune sur la dynamo.

2. Préparer et coordonner l'intégration des installations expérimentales existantes.
3. Contribuer à la conception et à l'intégration d'une installation dynamo commune de grande taille.
4. Préparer et coordonner l'intégration d'outils numériques sur la dynamo.

Le projet a reçu un accueil très favorable de la communauté concernée et de l'Union Européenne, mais pas suffisamment pour être financé.

Pour d'autres détails, voir site web : <http://www-lgit.obs.ujf-grenoble.fr/DYNECOR/>

3.3.3. Projet AMPERE

Depuis de nombreuses années, Antoine Alemany (EPM, Grenoble) et des collègues et officiels lettons militent pour la création d'un Institut franco-letton Ampère autour de la magnétohydrodynamique. Cet Institut regrouperait à Riga des recherches appliquées et fondamentales dans ce domaine d'excellence de la Lettonie. Cet Institut aurait en particulier vocation à accueillir une installation dynamo de grande taille.

En février 2005, le Ministère chargé de la recherche et de la technologie a mis sur pied un groupe de travail, piloté par Bernard Frois (CEA), pour étudier les suites à donner à ce projet. L'expertise scientifique du volet « dynamo » a été confiée au GdR « dynamo », qui a mandaté H-C Nataf pour suivre l'évolution du projet. Un financement spécifique a été versé au GdR par les Relations Internationales du CNRS pour cette tâche.

Dans ce cadre, le groupe de travail européen qui avait été prévu dans la préparation du projet DYNECOR a rédigé un document proposant la construction d'une plateforme dynamo à Riga.

Le projet d'Institut franco-letton est encore en phase de montage, et une prochaine réunion est prévue à Riga en juillet 2006.

Lors de son Assemblée Générale de mars 2006, le GdR « dynamo » a réitéré son intérêt pour une installation de grande taille mais exprimé des doutes sur sa réalisation dans le cadre de l'Institut Ampère.

3.4. Soutien à des colloques

Le GDR a soutenu plusieurs colloques portant sur des thèmes intéressant le GDR, et auxquels participeront des membres du GDR. Il s'agit des colloques :

3.4.1. Vortices and Field interactions Paris 6-10 septembre 2004

Le but de ce colloque était de faire le point sur les structures cohérentes observées en mécanique des fluides et leurs différentes interactions.

Voir site WEB:

<http://www.lmm.jussieu.fr/MEMBRES/ROSSI/EUROMECH-SITE/welcome.html>

3.4.2. Hamiltonian Systems, Control and Plasma Physics Fréjus 21-23 octobre 2004

Le but de ce colloque était de faire le point et discuter des progrès récents sur le contrôle du transport dans les systèmes hamiltoniens, et ses applications en physique des plasmas ou autres domaines connexes. Voir site WEB:
<http://www.cpt.univ-mrs.fr/~hscopp04>

3.4.3. Transport Chaotique et Complexité Carry 20-25 juin 2004

Le but de ce colloque était de discuter l'origine et les mécanismes des phénomènes de transport anormaux observés en mécanique classique et quantique, et qui sont généralement associés à des vols de Levy. Voir site WEB:
<http://147.94.187.213>

3.4.4. Ecole Astrophysical Fluid Dynamics Cargese 8-13 mai 2005

Le but de cette école, organisée en l'honneur de J-P. Zahn, et S. Bonazzola, était de faire le point sur des thèmes de mécanique des fluides astrophysique, sur lesquels ont travaillé ces deux grands scientifiques. Voir site WEB:
http://www.ast.obs-mip.fr/users/rieutord/Prog_cargese.html

3.4.5. Colloque ondes-inertielles Marseille 5-6 décembre 2005

Le but de ce colloque était de faire le point sur les ondes inertielles des écoulements tournants. Cette réunion qui a réuni une vingtaine de participants (LGIT, Obs. P.M., Obs. M.P., FAST, IRPHE) a suscité des discussions entre spécialistes du domaine, a permis de faire le point sur les différentes recherches en cours et d'ouvrir des perspectives de recherches et de collaborations entre intéressés. Voir annexe C.

3.4.6. Réunion Turbulence MHD et Dynamo (ENS Paris) 30-31 mai 2005

N. Leprévost et S. Fauve ont organisé une réunion sur la turbulence MHD et la dynamo à l'ENS. Cette réunion s'est poursuivie par une discussion sur l'effet du bruit sur les instabilités. L'idée était de faire intervenir de façon détaillée des gens que nous n'avons pas l'occasion d'entendre lors des réunions du GDR:

- Alexander Schekochihin (DAMTP, Cambridge) : *Effet de la turbulence sur le seuil de la dynamo*
- Mahendra K. Verma (IIT, Kampur) : *Turbulence MHD* (auteur d'une revue récente dans phys. reports)

On y ajouta des interventions plus courtes des participants mais surtout des discussions. Suite à cette réunion, A. Schekochihin demanda son inscription au GDR Dynamo, ce qui fut accepté.

3.4.7. Atelier Instrumentation Sodium Grenoble 30/11-1/12/2004

Les principaux objectifs de cet atelier étaient :

- Améliorer l'apport des expériences sodium
- Identifier les besoins et les problèmes
- Mettre en commun les expériences

- Définir les cahiers des charges
 - Concevoir et faire construire de nouveaux instruments.
- Il a réuni une quinzaine de chercheurs des principaux labos impliqués dans des expériences avec du sodium liquide (ENS-Lyon, CEA-Saclay, LGIT-Grenoble, LEGI-Grenoble). Nous avons eu le plaisir d'accueillir également J-C. Willemetz (Signal Processing) et Peter Frick (ICMM, Perm). (Voir annexe D)

3.5. Soutien à des collaborations nationales

Par son soutien (paiement des missions) et l'organisation des réunions, le GDR cherche à favoriser les collaborations entre différentes équipes françaises.

3.5.1. LEGI (Grenoble) – OCA (Nice)

Le but de cette collaboration est d'explorer la dynamique de fluide conducteur à faible nombre de Prandtl magnétique avec un forçage connu pour produire une dynamo de type effet Alpha, comme l'écoulement de G.O. Robert. Cette étude sera aussi, l'occasion de comparer les simulations numériques directes des "Large eddy Simulation" LES, avec des modèles en couches MHD.

3.5.2. ENS (Lyon) – OCA (Nice)

Le but de cette collaboration est d'explorer la dynamique de fluide conducteur à faible nombre de Prandtl magnétique en développant des approches complémentaires entre les simulations numériques et les expériences dans les métaux liquides. La comparaison entre données numériques et expérimentales concerne les phénomènes d'induction, de dynamo ou d'autres instabilités MHD. Elle passe également par une recherche d'observables communs, de sondes ponctuelles, de champs moyens temporels ou d'autres mesures permettant, par exemple, d'accéder à la topologie de l'écoulement et du champ magnétique. Les observables expérimentaux étant techniquement assez restreints, leur confrontation avec des quantités numériques accessibles en tous points et à tout instant est d'autant plus enrichissante.

3.5.3. LGIT (Grenoble)-IRPHE (Marseille)-OPM (Meudon) –LAT (Toulouse)

Nos équipes s'intéressent depuis plusieurs années à la dynamique des fluides en rotation et ont développé des montages expérimentaux et des codes de calcul destinés à étudier certains aspects des instabilités des fluides en rotation. L'un de ceux-ci concerne les instabilités elliptiques qui peuvent apparaître dans certaines conditions, dues au couplage entre deux modes inertiels en présence d'une contrainte extérieure appropriée. L'équipe de l'IRPHE a utilisé récemment la déformation elliptique d'une sphère pour générer ces instabilités. Une autre voie est de mettre le fluide en précession. C'est cette voie que nous souhaitons développer dans nos deux équipes, à l'aide de deux montages expérimentaux similaires mais de géométrie différente (cylindre, sphéroïde). D'autres aspects concernant le rôle de la précession dans l'établissement de la dynamo sont également à étudier. Des contacts plus étroits entre nos quatre équipes s'avèreront particulièrement fructueux pour réaliser ce projet.

3.5.4. LEGI (Grenoble) – GIT (Saclay)

Nous étudions l'influence d'un bruit sur la dynamo homopolaire de Bullard modifiée. Cette étude fait suite au travail de thèse de N. Leprovost qui a examiné le système cinématique. Nous prévoyons d'examiner le système dynamique.

3.5.5. LGIT (Grenoble) – GIT (Saclay)

Nous proposons de partager les savoir-faire de nos deux équipes pour progresser dans la mise au point d'une technique fiable de vélocimétrie Doppler ultrasonore adaptée aux écoulements dynamo en sodium liquide.

Une première campagne commune s'est déroulée du 16 au 18 janvier 2006 au CEA Cadarache. Pour la première fois, des profils de vitesse ont été mesurés avec la sonde du CEA dans le vortex de sodium du groupe GIT-Saclay. Le LGIT-Grenoble a contribué à ce succès en apportant son expertise et son vélocimètre DOP 2000 à fréquence d'émission ajustable. Les données récoltées sont en cours d'analyse dans l'équipe GIT du CEA-Saclay. Les expériences se sont déroulées dans la boîte à gant « Pénélope » du CEA-Cadarache. Le LGIT a également pu tester la réponse acoustique de divers assemblages sonde-bouchon utilisés dans son expérience DTS.

Dans les expériences réalisées en janvier 2006 à Cadarache, le GIT a ensemencé le sodium avec du sel anhydre. On ne sait pas encore le rôle joué par cet ensemencement. Dans le cadre de la Thèse de Nadège Gagnière et avec la collaboration de Philippe Roux, le LGIT explore actuellement une piste pour mesurer la quantité et la taille des objets qui diffusent les ultrasons dans le gallium liquide. Si cette approche aboutissait, nous pourrions l'utiliser pour caractériser les objets diffusants en sodium liquide et évaluer le rôle de l'ensemencement. Une nouvelle campagne commune de mesure dans la boîte à gant « Pénélope » serait prévue à cet effet.

3.5.6. Grenoble-Lyon-Paris : communication

Nous avons rédigé un court article dans "Image de la Physique 2006", visant à faire le point sur l'état de nos connaissances numériques, expérimentales et observationnelles en matière de dynamo, ainsi qu'une brève liste des défis à relever pour le futur. Parmi ceux-ci : l'influence de la turbulence, la prise en compte numérique de conditions aux limites et de paramètres réalistes, l'influence d'une rotation globale.

E. Dormy, H.-C. Nataf, J.-F. Pinton, L'effet dynamo, un casse-tête non linéaire, *Images de la Physique*, CNRS Ed., (2006).

4. PROSPECTIVE ET RENOUVELLEMENT

Durant ses quatre premières années d'existence, le GdR dynamo a permis de rassembler et de structurer la communauté française impliquée dans l'étude des écoulements magnétohydrodynamiques et la génération de champs magnétiques qui y est associée. Fort de ce succès, le GdR peut espérer promouvoir, durant un quadriennal à venir, un projet de recherche commun d'envergure.

Le GdR souhaite naturellement poursuivre sa politique scientifique, par l'organisation de réunions, tant plénières (sur une base annuelle) que spécialisées sur des aspects particuliers - comme les mesures expérimentales ou les problèmes de conditions aux limites dans les calculs numériques- et par le renforcement des interactions entre les différentes équipes du GdR. Il entend évidemment maintenir son rôle d'expertise pour les projets européens et internationaux, en tant que groupe d'experts identifiés. Il continuera également de représenter la communauté française impliquée dans l'étude de l'effet dynamo dans de tels projets.

La génération de champs magnétiques par effet dynamo est un sujet qui suscite un intérêt grandissant sur le plan international. De nombreuses expériences existent et d'autres sont en construction. Forte de l'expertise acquise ces dernières années grâce aux projets expérimentaux français, la communauté française semble être en bonne position pour apporter des contributions importantes à cet effort international.

Les dynamos fluides expérimentales utilisent du sodium liquide comme fluide conducteur. Ce choix est guidé par les caractéristiques physiques de ce métal, qui limitent la dissipation des courants électriques. L'efficacité de l'advection et de l'étirement du champ magnétique en comparaison de la résistivité électrique est mesurée par le nombre de Reynolds magnétique Rm . On peut montrer que ce nombre doit être supérieur à 10 (rigoureusement p^2) pour pouvoir espérer maintenir un champ magnétique par effet dynamo. Pour la plupart des écoulements dynamo, le seuil de l'action dynamo se situe plutôt autour de $Rm=100$. Ces valeurs peuvent sembler modestes, pourtant elles correspondent nécessairement à des problèmes de relativement grande taille avec de fortes puissances injectées. Pour s'en convaincre, il suffit de considérer le nombre de Reynolds hydrodynamique de tels écoulements. Celui-ci est déduit de Rm en le multipliant par le rapport entre le coefficient de diffusion magnétique et le coefficient de dissipation visqueuse, qui est une caractéristique du fluide. Ce rapport (l'inverse du nombre de Prandtl magnétique) est très grand pour le Sodium liquide, comme pour tous les métaux liquides, de l'ordre du million. Ainsi pour atteindre un nombre de Reynolds magnétique supérieur à 100, il faut atteindre des nombres de Reynolds hydrodynamiques de l'ordre de 10^8 . Ce type de régime nécessite des installations de grandes tailles. C'est pourquoi la communauté française présente au sein du GdR dynamo envisage un changement d'échelle expérimentale et veut travailler à la définition d'un dispositif expérimental commun.

Le comité de direction du GdR constitué en vue de ce nouveau contrat quadriennal (T. Alboussière, F. Daviaud, E. Dormy, S. Fauve, G. Hulot, J.F. Pinton, H. Politano, R. Teyssier) s'est réuni à Paris le 13 juin dernier. Les participants ont décidé ensemble et à l'unanimité de

travailler à définir cette évolution vers une installation expérimentale commune de grande taille, tout en conservant les moyens expérimentaux actuels qui se révèlent indispensables pour mener cette réflexion. L'objectif défini par ce comité est de travailler pendant les deux prochaines années (i.e. jusqu'au mi-parcours du quadriennal) à la définition de ce que pourrait être cette expérience commune. Pour parvenir à cet objectif, le GdR prévoit d'organiser une série de discussions pour synthétiser les informations quantitatives apportées par l'ensemble des expériences existantes (Riga, Karlsruhe, DTS, VKS, Lathrop) et des modèles numériques pour définir l'objectif scientifique principal d'une approche expérimentale commune. Il faudra se prononcer sur le choix d'une expérience unique ou d'une plateforme expérimentale. Les questions qui doivent impérativement être discutées au sein de l'ensemble de la communauté scientifique concernée sont avant tout les objectifs scientifiques principaux du dispositif et la détermination d'une configuration expérimentale bien choisie en utilisant les résultats des expériences précédentes et de simulations numériques comme guide. Il faut également définir les protocoles d'échange et de mise à disposition des résultats. Il est important de susciter cette discussion au sein du GdR, afin que l'ensemble de ses participants soient impliqués dans ce projet. De plus, il faut recevoir des contributions aussi diverses et nombreuses que possible quant aux nouvelles géométries intéressantes et réalistes pour produire expérimentalement l'effet dynamo. Cette réflexion doit permettre de déterminer les choix technologiques importants. Elle sera suivie d'un rapport d'étape à mi-parcours du GdR. Ce rapport définira la ou les configuration(s) retenue(s), il précisera les enjeux scientifiques communs et les choix effectués. Il analysera la faisabilité d'un tel dispositif expérimental sur les bases de l'expertise des équipes françaises. Les deux années suivantes seront consacrées à sa préparation (bureau d'étude, financement, implantation, ...). Le financement des études sera recherché par ailleurs et ne sera évidemment pas assumé par le GdR, mais celui-ci pourra représenter les équipes lors des demandes de financement.

Pour pouvoir mener à bien ce grand projet expérimental, le GdR doit également contribuer aux échanges au sein des équipes numériques et en particulier, renforcer les interactions entre les numériques et les expérimentateurs. Pour cela une session de travail sera organisée sur les questions ouvertes d'un point de vue numérique. Le GdR appuiera également les demandes d'heures de calcul effectuées auprès des centres nationaux en lien avec la réflexion sur un dispositif expérimental commun. Le GdR encouragera les interactions entre les équipes de numériques, ainsi qu'entre les numériques et les expérimentateurs. Ce soutien se fera d'abord sous la forme de missions et de Workshops spécifiques. Il souhaite également soutenir, au plan national, le développement de moyens numériques de très haute performance, indispensables à la réalisation de simulations dynamo réalistes. La communauté numérique sera naturellement impliquée lors de la définition du projet expérimental. De la même manière, les contributions venant de la communauté des observateurs (en géophysique et en astrophysique) seront fortement encouragées.

Avec le développement de collaborations de plus en plus importantes entre les équipes du GdR et la nécessité de réunions supplémentaires associées à la construction du projet expérimental, nous prévoyons une demande accrue de soutien de la part du GdR tant pour des réunions thématiques que pour des missions inter-laboratoires. Le projet que nous présentons nécessite un nombre de réunions important, dépassant l'unique réunion plénière annuelle. Au cours du premier quadriennal le GdR n'a pu assumer son fonctionnement que grâce au reliquat du GdR MFGA. Un

budget annuel de 10.000 euros permet donc tout juste d'assurer le fonctionnement minimum des collaborations au sein du GdR et l'organisation d'une réunion annuelle. Le projet de plus grande envergure que nous proposons dans ce dossier va nécessiter un nombre accru de réunions, qui sont essentielles à l'élaboration d'un dispositif commun. Pour cette raison le soutien demandé au Département MPPU pour le quadriennal à venir est de 20.000 euros par an.

Le GdR encouragera également les échanges entre les équipes (garants de la cohésion du projet) en appuyant les demandes de financement de thèses sous la direction conjointe de deux équipes du GdR (par exemple pour développer les interactions entre l'approche expérimentale et l'approche numérique). Par ailleurs, il souhaite aussi demander au département le financement de deux années de postdoc. Ce financement sera attaché au GdR et non à une équipe et le chercheur postdoctoral contribuera à la cohésion entre les équipes. Une durée de deux années est nécessaire pour permettre ce rôle et pour permettre une contribution significative au projet. Ce chercheur postdoctoral sera affecté à un objectif scientifique précis en relation directe avec le projet expérimental. Ce chercheur effectuera des séjours dans l'ensemble des équipes participantes pour bénéficier de leur savoir faire. Ce financement postdoctoral contribuera à fédérer les équipes du GdR. Il est demandé pour les années 2 et 3 du quadriennal.

Enfin le GdR souhaite encourager le développement des collaborations à l'échelle européenne. L'un des volets de ces collaborations étant l'*Initiative Ampère*, menée avec la Lettonie. Afin de permettre les échanges nécessaires pour la construction de telles collaborations, il est souhaitable que le GdR dynamo prenne la forme d'un « GdR européen ». Si cette forme -qui a été proposée lors des réunions de travail de l'*Initiative Ampère*- est retenue, un financement annuel supplémentaire de 10.000 euros sera nécessaire afin d'assurer les échanges de scientifiques et les invitations de chercheurs au niveau européen.

Annexe A

Liste des membres et des laboratoires participants au GDR Dynamo

GIT (CEA Saclay)

A. Chifaudel
B. Dubrulle
F. Daviaud
C. Gasquet
C. Normand
L. Marié
F. Ravelet
N. Leprovost
R. Monchaux

LMM (Jussieu)

M. Rossi
E. Jossieran
T. Gomez

ENS (Paris)

F. Pétrélis
S. Fauve
N. Mordant
M. Berhanu

ENS (Lyon)

J-F. Pinton
Ph. Odier
M. Bourgoïn
R. Volk
E. Grenier

Ecole Centrale (Lyon)

C. Cambon
J-P. Bertoglio

ENSEM (Nancy)

J. Angeli
J-P. Brancher
S. Dufour
E. Plaut
L. Vinsard
B. Laporte

LEGI (Grenoble)

R. Avalos-Zuñiga
M. Peyrot
F. Plunian

Madylam (Grenoble)

A. Alemany

LML (Lille)

J-P. Laval

LIMSI (Orsay)

C. Nore
R. Laguerre
J.L. Guermont
L. Tuckerman
P. Boronski

IRPHE (Marseille)

P. Legal
M. Lebars
L. Lacaze
S. Ledizes

Université Marseille

O. Agullo
S. Benkadda
Beyer
D. Escande
X. Leoncini
K. Schneider

CPT (Luniminy)

R. Lima

INLN (Nice)

A. Celani
P. Chossat
P. Laure

OCA (Nice)

Y. Ponty
H. Politano
U. Frisch
A. Noullez
D. Vincenzi

CETP

L. Rezeau
R. Smets
G. Belmont

SAP (CEA Saclay)

R. Teyssier
S. Turc-Chièze
S. Brun
L. Jouve

Observatoire Midi- Pyrénées

M. Rieutord
F. Lignières

Observatoire de Paris- Meudon

J. Léorat
J-P. Zahn
T. Lehiner
S. Mathis
F. Hersant

IAS (Orsay)

S. Galtier

Université de Nantes

Ch. Sotin
B. Langlais

IIPG (Paris)

E. Dormy
G. Hulot
J. Aubert
A. Chulliat
S. Labrosse
A. Iskakov
V. Morin

LGIT (Grenoble)

Th. Alboussière

D. Brito

Ph. Cardin
D. Jault

H-C. Nataf

D. Schmitt
N. Gillet
B. Deleplace
N. Gagnières
N. Schaeffer
R. Deguen
A. Fournier

Laboratoires étrangers

A. Pouquet (NCAR, USA)
A. Schekochihin (DAMTP, UK)
A. Corvoisier (Leeds, UK)
E. Kersalé (Leeds, UK)
A. Lanotte (Roma, Italie)

Annexe B
Programme des réunions générales du GDR Dynamo

Journées du GDR DYNAMO
12 et 13 juin 2003 à Saclay

Jeudi 12 juin:

9h30-10h Accueil des participants
10h-11h A. Celani (INLN, Nice)
Problèmes théoriques en dynamo et MHD
11h-11h30 Ph. Cardin (LGIT, Grenoble)
Panorama des théories liées à la dynamo en France
11h30-12h30 Discussion

12h30- 13h30 Buffet

13h30-14h30 D. Brito (LGIT, Grenoble)
Dynamos expérimentales
14h30-15h E. Dormy (IPG, Paris)
Panorama des expériences liées à la dynamo en France
15h-15h30 Pause
15h30-16h30 Discussion
16h30-17h30 F. Daviaud (CEA/Saclay)
Un point sur l'Europe et discussion

Vendredi 13 juin:

9h-10 h Y. Ponty (OCA, Nice)
Modèles numériques de dynamo
10h-10h30 S. Fauve (ENS, Paris)
Panorama du numérique lié à la dynamo en France
10h30-11h Pause
11h-12h Discussion

12h-13h30 Buffet

13h30-14h E. Dormy (IPG, Paris)
Geodynamo: Observations et Modèles
14h-14h30 S. Brun (CEA, Saclay)
Dynamo solaire: Observations et modèles
14h30-15h J-F. Pinton (ENS, Lyon)
Panorama des observations en France
15h-15h30 Pause
15h30-16h30 Discussion

Journées du GdR DYNAMO
4 et 5 mai 2004 à Nice

Mardi 4 Mai

9:00 - 10:00 : Accueil des participants
10:00 - 11:00 : **Résultats expérimentaux ou théoriques récents**
Sebastien Aumaitre : Effets d'un bruit multiplicatif sur une instabilité.
Béregère Dubrulle : Seuil de dynamo dans un milieu turbulent.
Nicolas Gillet : Etude expérimentale et numérique de la magnéto-convection en rotation rapide.
11:00 - 11:30 : Pause Café
11:30 - 12:30 : **Résultats numériques récents**
Jacques Léorat : Le flot laminaire engendré par précession est-il une dynamo cinématique ?
Florent Ravelet : Effets des conditions aux limites sur une dynamo cinématique de type von Karman.
Sacha Brun : Effet Dynamo dans le coeur des étoiles A.
12:30 - 14:15 : Déjeuner
14:15 - 16:00 : **Atelier de travail Simulations Numériques**
animateur: Emmanuel Dormy
- Méthodes numériques (Spectrales, Eléments-finis, Volumes-finis, Eléments-spectraux)
- Conditions aux limites
- Intégration en temps (quel schéma temporel ?)
- Modèles de fermeture pour les différents régimes de la turbulence MHD (LES-SGS)
- Méthodes adaptatives (AMR)
- Interactions modèles numériques/expériences.
16:00 - 16:30 : Pause café
16:30 - 18:00 : **Atelier de travail Expériences**
animateur: Phillipe Odier
- Effets d'induction : comparaison manip/simul, effet d'un écoulement non-stationnaire
- Influence de la turbulence : viscosité, diffusivité turbulente
- Cas d'un champ fort agissant sur l'écoulement (convection en présence de champ)
- Mesures hydrodynamiques
- Effets des conditions aux limites sur la dynamo

Mercredi 5 Mai

9:30 - 11:00 : **Atelier de travail Approches théoriques**
animatrice: Béregère Dubrulle
1) *Effet d'un bruit multiplicatif sur les instabilités.*
Provocateur: S. Aumaitre Modérateur; B. Dubrulle
2) *Du bruit et de la résonance dans la rotation/précession.*
Provocateur: J. Léorat Modérateur; B. Dubrulle
3) *Dissipations et échelles dans la géodynamo en régimes de champs faible et fort.*

Provocateur: Henri-Claude Nataf Modérateur; B. Dubrulle
 4) *Les Conditions aux limites sur B.*
 Provocateur: F. Plunian Modérateur; B. Dubrulle
 11:00 - 11:30 : Pause café
 11:30 - 12:30 : Atelier de travail Observations géo. et astro.
 animateur: Sacha Brun
 12:30 - 14:00 : Déjeuner
 14:00 - 15:00 : **Session ouverte**
 - Alice Courvoisier : Linear and Non Linear alpha-effect in chaotic flows.
 - Evy Kersalé : Instabilité Magnéorotationnelle: modes globaux avec accretion.
 - Christiane Normand : Galerkin analysis of cylindrical dynamos.
Session : Hélicité Magnétique
 15h-16h : Axel Brandenburg Helical MHD turbulence and alpha effect.
 16h-16h30 : Pause café
 16h30-17h30 : Mitch Berger The role of magnetic helicity in the solar dynamo.

**Journées du GDR DYNAMO
 21-23 mars 2005 à Grenoble**

Lundi 21 mars:

12h00-14h00 Accueil des participants
 14h00-15h00 J-P. Zahn (Obs. Meudon)
Observation magnétique du Soleil
 15h00-15h15 Discussion
 15h15- 15h30 Pause

Session théorique (*chair : F. Plunian*)
 15h30-15h55 R. Avalos-Zuniga (LEGI, Grenoble)
 16h00-16h25 B. Dubrulle (GIT, Saclay)
 16h30-16h55 F. Pétrelis (ENS, Paris)
 17h00-17h25 S. Aumaitre (ENS, Paris)
 17h30-18h00 Pause
 18h00-18h30 DYNACOR (animateur : H-C. Nataf)

Mardi 22 mars:

9h00-10h00 N. Olsen (DSRI, Danemark)
Magnetic observation of the earth
 10h00-10h15 Discussion
 10h15- 10h30 Pause

Session observations (*chair : D. Jault*)
 10h30-10h55 C. Eymin (LGIT, Grenoble)
 11h00-11h25 G. Legaut (LGIT, Grenoble)
 11h30-11h55 A. Chulliat (IPG Paris)

12h00- 17h00 Repas et après-midi libre

Session numériques (*chair : A. Fournier*)
 17h00-17h25 Y. Ponty (OCA, Nice)
 17h30-17h55 F. Plunian (LEGI, Grenoble)
 18h00-18h25 N. Schaeffer (LGIT, Grenoble)
 18h30-18h55 J. Aubert (IPG Paris)
 19h00-19h15 Discussion

19h30-20h30 Repas

20h30-21h30 Ch. Sotin (LPG, Nantes)

Observation magnétique des planètes du système solaire

Mercredi 23 mars:

Session expérimentale (*chair : T. Alboussière*)

9h00- 9h25 P. Le Gal (IRPHE, Marseille)

9h30- 9h55 R. Volk (ENS Lyon)

10h00-10h25 H-C. Nataf (LGIT, Grenoble)

10h30-10h55 F. Daviaud (GIT, Saclay)

11h00-11h15 Discussion

11h15- 11h30 Pause

Discussion générale (*chair : Ph. Cardin*)

11h30- 12h00 Bilan et perspectives

Journées du GDR DYNAMO

27 et 28 mars 2006 à Lyon

Lundi 27 mars:

10h-11h C. Forest (Madison, USA)

Revue sur les effets de la turbulence sur le seuil de la dynamo

11h00-13h00 Session numérique

13h00- 14h00 Déjeuner

14h00-15h00 T. Alboussière (LGIT, Grenoble)

Turbulence MHD sous champ imposé

15h00-17h00 Session théorie

17h00-17h30 Pause

17h30-18h30 H-C. Nataf (LGIT, Grenoble)

Le point sur le projet Ampère

18h30-19h30 B. Dubrulle (GIT, Saclay)

Le point sur le GDR et son renouvellement

Mardi 28 mars:

9h00-9 h30 D. Schmitt (LGIT, Grenoble)

Résultats récents de DTS

9h30-10h00 M. Berhanu (ENS, Paris)/ F. Ravelt (GIT, Saclay)

Résultats récents de VKS

10h00-10h15 Pause

10h15-10h45 C. Forest (Madison, USA)

Results from the Madison dynamo experiments

10h45-12h30 Session expériences

12h30- 13h30 Déjeuner

13h30-14h00 K. Ferrière (LAT, Toulouse)

Revue sur les champs magnétiques galactiques

14h00-15h30 Session astrophysique

15h30-16h00 Pause

16h00-17h00 H. Lutjens

Revue sur les problèmes MHD dans les plasmas (tokamaks/ITER)

Annexe C
Réunion ondes inertielles

L'IRPHE a organisé les 5 et 6 décembre 2005 une réunion ayant pour thème les ondes inertielles (programme ci-joint). En effet plusieurs groupes du GDR Dynamo, avaient montré un intérêt certain pour l'étude des ondes inertielles des écoulements tournants. Que ce soit dans les écoulements turbulents en rotation, dans les écoulements de cylindres ou de sphères en précession, ou dans les résonances de l'instabilité elliptique, ces ondes peuvent être excitées et sont susceptibles de modifier la structure des écoulements. De plus, les ondes inertielles pourraient jouer un rôle dans la dynamique des noyaux liquides des planètes, dans les disques d'accrétion ou encore dans les systèmes d'étoiles doubles. Cette réunion qui a réuni une vingtaine de participants (LGIT, Obs. P.M., Obs. M.P., FAST, IRPHE) a suscité des discussions entre spécialistes du domaine, a permis de faire le point sur les différentes recherches en cours et d'ouvrir des perspectives de recherches et de collaborations entre intéressés. Certaines présentations sont disponibles sur le site web du GDR.

Programme des journées Ondes inertielles. IRPHE- Marseille, 5 et 6 Décembre 2005

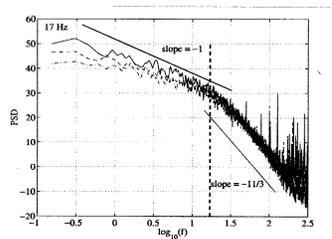
| Lundi 5 décembre | | |
|----------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 14h-14h15 | P. Le Gal | Accueil |
| 14h15-15h | S. Le Dizès, IRPHE | Les ondes inertielles et leurs résonances |
| 15h-15h30 | D. Schmitt, LGIT | Effet de la viscosité sur les modes inertiels dans un sphéroïde |
| 15h30-16h | L. Lacaze | Instabilité multipolaire dans un sphéroïde |
| Pause et Discussions | | |
| 16h30-17h | J. Léorat Obs. PM | Expérience ATER : configuration et résultats, faisabilité d'une dynamo expérimentale |
| 17h30-18h | F. Moisy, FAST | Excitation d'ondes inertielles dans un cylindre en rotation |
| 20 h | Dîner | |

| Mardi 6 décembre - matinée | | |
|--------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 9h45-10h30 | M. Rieutord, Obs. MIP | Les modes inertiels et gravito-inertiels singuliers |
| 10h30-11h | D. Jault, LGIT | Ondes inertielles en présence d'une graine |
| Pause et Discussions | | |
| Dans le cadre des séminaires internes de l'IRPHE | | |
| 11h30-12h | M. Le Bars, IRPHE | Compétition entre instabilité elliptique et convection |
| 12h-12h30 | C. Eloy, IRPHE | Analyses et expériences d'un écoulement dans un cylindre en précession |
| Déjeuner au « cyprès bleu » | | |

| Mardi 6 décembre - après-midi | | |
|-------------------------------|---------------------|-------------------------------------------------------------|
| 14h-14h30 | T. Lehner, Obs. PM | Couplage de modes |
| 14h30-15h | W. Herreman, IRPHE | Induction magnétique et instabilité elliptique |
| 15h-15h30 | D. Schmitt, LGIT | Observation de modes inertiels et instabilité de précession |
| 15h30-16h30 | N. Schaeffer, IRPHE | Turbulence d'ondes de Rossby |
| Pause et Fin | | |

Annexe D
Compte-rendu Atelier Instrumentation Sodium
 Grenoble 30/11-1/12/2004

densité spectrale de puissance magnétique dans l'expérience VKS



Compte-rendu

Les principaux objectifs de cet atelier étaient :

- Améliorer l'apport des expériences sodium
- Identifier les besoins et les problèmes
- Mettre en commun les expériences
- Définir les cahiers des charges
- Concevoir et faire construire de nouveaux instruments

Il a réuni une quinzaine de chercheurs des principaux labs impliqués dans des expériences avec du sodium liquide (ENS-Lyon, CEA-Saclay, LGIT-Grenoble, LEGI-Grenoble). Nous avons eu le plaisir d'accueillir également J-C. Willemetz (Signal Processing) et Peter Frick (ICMM, Perm). Trois ateliers ont fonctionné en parallèle, et ce compte-rendu reprend les relevés de conclusions qu'ils ont partagé en fin de réunion.

Les thèmes des 3 ateliers étaient :

- atelier 1 : vélocimétrie ultrasonore (rédacteur P. Cardin)
- atelier 2 : mesures de champ magnétique et signaux électriques (rédacteur T. Alboussière)
- atelier 3 : mesures de pression, de couple, et compatibilité électromagnétique (rédacteur D. Schmitt)

Les échanges ont été fructueux et ont permis de bien faire le point et de jeter les bases de collaborations pour le futur.

Atelier 1 : vélocimétrie ultrasonore

Cahier des charges pour les expériences sodium :

- Vitesse grande : 50m/s
- Taille actuelle 20cm
- $D_{max} V_{max} = C2/8f$
- $Re = Rm = C2/8f = 25002/8.106 = 1$

- Particules: taille du λ longueur d'onde. Pour 1 MHz , $\lambda=2,5$ mm d'où 0.63 mm
- Quelles particules
- Sonde haute température; 150°C , paroi INOX.
- Fluctuations temporelles du champ de vitesse.

Instruments utilisés :

- DOP 1000
 - DOP 2000
- (tous deux fabriqués par Signal Processing, Suisse)

Difficultés rencontrées et solutions :

- Pourquoi n'a-t-on pas de signal au début ?
Effet d'écho dans la paroi qui se superpose au signal.
- Sondes: Peut-on intégrer une sonde directement dans la carcasse du réservoir sodium ?
AC dit qu'il existe une nouvelle sonde inox. On peut alors la plonger dans le sodium directement.
Willemetz : pas de fabrication en série pour l'instant.
Accélération centrifuge ?
- Plus on augmente de la fréquence, plus le champ proche est grand.
- Particules: test du NaCl anhydre à Cadarache à venir. ZBr2 dans le gallium. Les oxydes naturels. Il faut des oxydes pour ensemercer (Dresden). Autre théorie, les oxydes piègent du gaz et c'est les bulles de gaz qui font les particules. Petit bulleur dans le sodium?
- Focalisation de la sonde: il faut augmenter la fréquence et le diamètre de la sonde pour augmenter sa focalisation. Ex sonde de Cadarache diamètre: 32mm. C'est pas mal focalisé : 15mm jusqu'à 200mm et 10 mm jusqu'à 300mm.
- Épaisseur de paroi: le mieux est une lame λ d'onde le problème est avant tout un problème d'interface. Le mieux est de réduire l'épaisseur pour éviter les ringings.
- 2 problèmes: 4MHz ça marche, à 150°C. et peut à 200°C un court temps (minute à heure) détruite au bout de 4 h.

Problème du bruit électromagnétique :

- BEM, vient des moteurs à hacheurs.
- Le rayonnement... ça peut encore aller, mais les perturbations par les fils, nécessitent des filtres
- Changer la fréquence d'émission peut permettre de s'affranchir du bruit.
- Se brancher sur un circuit différent. Ou filtre pour pas de retour vers le réseau.
- Quand on change la PRF, petite fenêtre de mesure. Rejaillissement sur la fréquence.

Atelier 3 : mesures de pression, de couple, et compatibilité électromagnétique

Mardi 30/11 - Mercredi 1/12/2004

Mesures de pression

Participants :

Alradi MAHMOUD (PAMIR, LEGI, Grenoble)

Philippe ODIER (ENS, Lyon)

Jean-Paul MASSON, Henri-Claude NATAF, Denys SCHMITT (Géodynamo, LGIT, Grenoble)

Deux types de capteurs :

- capteur de charge (nécessite un convertisseur de charge)
meilleure résistance thermique (200 à 300 °C)
mais le convertisseur, lui, ne résiste qu'à 120 °C (limite de l'électronique)
- capteur piézo (convertisseur intégré)
moins bonne résistance thermique (135 °C)
seule solution en cas de rotation (cf. collecteur tournant)

Ce que l'on veut mesurer :

- spectres de pression turbulente (1 Hz à quelques milliers de Hz)
- passage de structures devant le capteur (vortex...)
- ondes (de torsion ?)

Quel est le signal attendu dans les différents cas ?

Capteurs utilisés dans les différentes expériences :

manip Lyon au gallium : d'abord PCB 112A21 (résolution 14 Pa)
puis Kistler 603B (dynamique seul) et 4073A/4075A (statique + dynamique)
(capteur de charge + ampli de charge + ampli)
NB : les 2 sont bien cohérents dans la gamme dynamique
signaux : pics importants (jusqu'à - 2 bars) donc peu sensible au bruit
domaine de température : 120 - 180 °C

manip VKS : Kistler 7031 (dynamique)
ampli de charge Bruel & Kjaer
pas de filtre utilisé (signal important, bruit négligeable)
signal entre 1 et qq milliers d'Hz, dynamique 40 dB, spectre en -7/3

sur VKS2 : capteur Kistler 7031, refroidi à l'air

manip DTS-Grenoble : PCB 112A22 (résolution 7 Pa)
signaux : <50 mV, très bruité (pics à haute fréquence), à travailler pour réduire le bruit
utilisation d'un filtre, mais quid de la bande passante ?
domaine de température : 135 °C

ordre de grandeur de signal attendu ~120 Pa (calculs N Schaeffer)

Pamir : capteur Kulit
thermoacoustique dans l'air à 600 °C, 5 bars en statique
ondes acoustiques : kHz, qq mbars

Riga : capteur Kistler 6001, spectre en -7/3

Commentaires :

- tous les capteurs sont compensés en accélération
- comparaison entre capteurs : comparer plutôt la résolution (en Pa) que la sensibilité, car celle-ci dépend en partie de la chaîne d'amplification (NB : Kistler ne fournit pas cette résolution)
- comparaison des bruits (en relatif, en absolu)
niveau du bruit sur VKS : très faible puisque pas de contact tournant
niveau du bruit sur DTS : jusqu'à 50 à 100 mV parfois (correspond à 3 à 6000 Pa au niveau du capteur), réduit à 10 mV avec filtre actif passe-bas avec gain additionnel de 20 dB
- discussion sur les signaux, le spectre et sa dynamique (cf PRE 58 (1998) 7397 et réf.)
la coupure en fréquence est due à la dynamique du capteur, pas à sa résolution temporelle.

| | Kistler 7031 | Kistler 6001 | PCB 112A22 | PCB 106B50 | PCB 112A04 |
|-------------------------|-----------------|-----------------|--------------------|-----------------------|---------------|
| sensibilité | -0.55 pC/kPa | -0.15 pC/kPa | 14.5 mV/kPa | 72.5 mV/kPa | 0.87 pC/kPa 2 |
| résolution | ? | ? | 7 Pa (= 0.1 mV) | 0.5 Pa (= 0.04 mV) | 2 Pa |
| pression max mesurée | 25000 kPa | 25000 kPa | 345 kPa | 35 kPa | 690 kPa |
| pression maxi supportée | 35000 kPa | 35000 kPa | 3450 kPa | 3450 kPa | 20700 kPa |
| limite basse fréq. | "quasistatique" | "quasistatique" | 0.5 Hz | 0.5 Hz | |
| fréq. résonance | 80 kHz | 150 kHz | 250 kHz | 40 kHz | 60 kHz |
| température max | 200 °C | 350 °C | 135 °C | 120 °C | 315 °C |
| diaphragme | inox | inox | inox | inox | inox |
| diamètre | 9.5 mm | 5.55 mm | 5.53 mm | 15.7 mm | 11.05 mm |

1 : soit 550 mV/kPa avec convertisseur de charge Kistler 5011B (temp. maxi = 50 °C)

2 : soit 8.7 mV/kPa avec convertisseur de charge PCB 422E36 (temp. maxi = 121 °C)

Moteurs - Couples

VKS : 2 moteurs couplés en maître/esclave :

un seul est régulé en vitesse, il fournit l'information de couple au second qui régule en couple
Wattmètre sur une phase donne des résultats (VKS) : nécessité de phases équilibrées

Il existe des wattmètres triphasés (Langlois, Watteco...)

Validité de l'étalonnage à bas couple ??? Secouer les constructeurs pour avoir des données ?

Calibration des couples à faire peut-être sur banc d'essai ? (LEGI, ENS HMG)

Compatibilité électro-magnétique (CEM)

faire très attention à l'installation (règle d'or : équipotentialité)
attention au régime de neutre
stage chez AEMC très instructif de ce point de vue (JP Masson)
mesure des bruits pas toujours évidente : à faire dans différentes conditions
faire faire une étude complète pas des spécialistes ?

VKS2 : selfs, filtres conseillés par Leroy-Sommer

Précession Grenoble :
filtres Scheffner conseillés par Yaskawa
installation CEM cruciale