

Réunion GDR Turbulence / GDR Dynamo

Nice, 6 novembre - 9 novembre 2006

Rapport sur la session n^o 4

Rôle des grandes échelles ; instabilités en présence de bruit (bifurcations dans les milieux turbulents, dynamos à bas P_m)

(Rapport de Florent Ravelet)

Animatrice : B. Dubrulle, GIT, CEA-Saclay.

Intervenants : R. Laguerre, LIMSI (Orsay).

C. Nore, LIMSI (Orsay).

M. Behranu (ENS-Paris) et R. Monchaux (CEA-Saclay),
collaboration VKS.

Y. Ponty, Observatoire de la côte d'azur (Nice).

A. Courvoisier, University of Leeds.

M. Peyrot, LEGI/LGIT (Grenoble).

J. Léorat, LUTH (Meudon).

M. Bourgoïn, LEGI/ENS-Lyon (Grenoble/Lyon).

A. Alexakis, Observatoire de la côte d'azur (Nice).

F. Ravelet, GIT, CEA-Saclay.

Introduction

Cette session animée par B. Dubrulle s'est presque exclusivement articulée autour du problème de la dynamo à bas nombre de Prandtl. Divers aspects ont été abordés, par le biais d'approches théoriques, d'expériences numériques et d'expériences de laboratoire. Une grande partie des équipes représentées sont en très forte interaction. Après un résumé de l'introduction de B. Dubrulle, incluant des références aux diverses interventions, nous en présentons une synthèse non chronologique.

Effet dynamo turbulent et turbulence MHD : L'effet dynamo est une instabilité du champ magnétique B due à l'écoulement v d'un fluide conducteur. Le problème est décrit par les équations de la Magnéto-Hydrodynamique : équations de Naviers-Stokes d'une part, et équation d'induction d'autre part. Sous certaines conditions, un champ magnétique peut croître et être auto-entretenu. Cet effet est la cause des champs magnétiques observés pour certains objets astrophysiques (soleil, planètes, galaxies), la dynamique d'astres en présence de champs fossiles étant décrites par le même jeu d'équations. Dans ce contexte astrophysique, les valeurs du nombre de Reynolds R_e et du nombre de Reynolds magnétique R_m —construit sur la diffusivité magnétique— sont très importantes. On s'attend alors à des écoulements turbulents. De plus, pour les métaux liquides usuels, le nombre de Prandtl magnétique P_m est très faible : la diffusivité magnétique est beaucoup plus grande que la viscosité cinématique. Les expériences dynamo de laboratoire sont donc *a priori* en écoulement turbulent. L'effet dynamo peut ainsi être considéré comme un paradigme d'une instabilité en présence de "bruit".

Dynamo dynamique et dynamo cinématique : On peut remarquer que l'équation d'induction est linéaire en B et v . La saturation non-linéaire est alors assurée *via* la force de Lorentz sur l'écoulement. On peut alors étudier le problème complet : on parlera de dynamo dynamique (interventions de M. Behranu & R. Monchaux, Y. Ponty et M. Bourgoïn, évocation des travaux de A. Schekochin et N. Schaeffer), ou bien étudier l'instabilité sur l'équation d'induction seule, pour un champ de vitesse prescrit : on parlera de dynamo cinématique (interventions de R. Laguerre, C. Nore, A. Courvoisier, M. Peyrot et J. Léorat). Dans le cadre dynamique, le couplage non linéaire entre les deux équations donne lieu, même en absence d'effet dynamo à des transferts entre champ de vitesse et champ magnétique non triviaux (intervention d'A. Alexakis).

Écoulement moyen vs. fluctuations : On peut décomposer un écoulement turbulent entre partie moyenne et partie fluctuante. La moyenne temporelle de l'écoulement seule a ainsi permis de comprendre les seuils des expériences de Riga (Lettonie) et Karlsruhe (Allemagne), en terme de dynamo cinématique. Le très récent succès de l'expérience VKS ("french washing-machine" en sodium liquide) motive aussi des études de dynamo cinématique pour le champ de vitesse moyenné dans le temps mesuré dans l'expérience en eau du CEA-Saclay (interventions de C. Nore et R. Laguerre).

Les fluctuations interviennent de manière multiplicative dans le problème, ce qui en complique l'analyse théorique. Dans certains cas (séparation d'échelle, faibles fluctuations), on peut les modéliser par des arguments de type "mean-field theory" (effet α , A. Courvoisier), ou bien les traiter de manière perturbative (évocation des travaux de C. Normand et S. Pétrélis). Notons en revanche que dans l'écoulement fermé cisaillé de von Kármán les fluctuations temporelles sont dominées par les grandes échelles spatiales (intervention de F. Ravelet). Cela motive la comparaison par DNS entre dynamo cinématique avec champ de vitesse stationnaire seul et champ turbulent complet abordée par Y. Ponty d'une part, et les études spécifiques des effets de l'échelle des fluctuations et de leurs corrélations discutées par B. Dubrulle, A. Courvoisier et M. Peyrot d'autre part.

Synthèse des interventions

J. Léorat nous présente une étude théorique et expérimentale sur l'écoulement engendré dans un cylindre tournant en précession. Cet écoulement possède de la rotation différentielle et des recirculations non négligeables. Il ne semble pas donner d'effet dynamo cinématique pour des valeurs de R_m "raisonnables". L'ajout d'ailettes sur les parois est suggéré au moment des questions comme moyen de modifier l'écoulement favorablement.

M. Behranu et R. Monchaux interviennent au cours de la session pour présenter sous forme de "teasing" les premiers résultats de la dynamo VKS (thème 7, session du 9 novembre). La configuration dynamo se caractérise par une couche de sodium au repos entourant un écoulement de type "french washing-machine", un fin anneau dans le plan central et des turbines en fer doux. En contrarotation, le seuil est autour de $R_m = 32$, et dépend du paramètre d'ordre choisi. La bifurcation est légèrement imparfaite. Ni le seuil ni la géométrie du mode dynamo saturé ne sont en accord avec les études cinématiques (effectuées sans prendre en compte les turbines en fer doux, voir ci-dessous). En contrarotation déséquilibrée, des régimes dynamiques différents peuvent être atteints (stationnaires, de bursts, renversements aléatoires).

Une expérience de dynamo turbulente en Gallium est présentée par M. Bourgoïn. Il s'agit d'un montage "Bullard - von Kármán" : un champ axial appliqué donne un champ induit toroidal dans le plan de cisaillement d'un écoulement de von Kármán en contrarotation parfaite (effet ω). Ce champ est mesuré par un gaussmètre, et le signal recueilli est rebouclé sur l'alimentation du champ appliqué initial. La saturation est liée à la puissance de cette alimentation. Des régimes dynamiques divers sont obtenus : intermittence on-off et renversements. Avec plus de puissance électrique, des régimes où la saturation est liée à une rétroaction sur l'écoulement sont envisageables.

R. Laguerre présente un nouveau code numérique MHD complet, 3D, pour géométries finies axisymétriques. Il est possible d'étudier des sauts de conductivité, et à terme de perméabilité magnétique. Le code est spectral dans la direction orthoradiale et utilise des éléments finis dans les deux autres. Les conditions aux limites électromagnétique sont traitées par une méthode originale de pénalisation. Les deux parties (Navier-Stokes et induction) du code ne sont pas encore couplées. R. Laguerre présente des résultats portant sur l'éclatement tourbillonnaire en rotor-stator (comparaison aux travaux de Spohn 1998), jusqu'à $Re \simeq 1500$, puis des études de dynamo cinématique pour un écoulement de Taylor-Couette avec cylindre extérieur au repos. C. Nore présente ensuite des études systématiques de dynamo cinématique pour le champ de vitesse moyenné dans le temps de l'expérience VKS (en configuration non-dynamo), et pour un écoulement analytique proposé par Marié, Normand & Daviaud (élevé ainsi au rang de benchmark pour les codes cinématiques cylindriques). Les effets de l'ajout de couche conductrices sur les parois latérales et sur les couvercles sont étudiés et comparés aux travaux de Ravelet *et al.*

et Stefani *et al.* Le nouveau code permet en plus de prendre en compte les différents sauts de conductivité dans l'expérience. Ceux-ci ne semblent pas affecter les seuils au premier ordre. A venir : étude des sauts de perméabilité.

B. Dubrulle rappelle le fait que dans des DNS de dynamo dynamique (3D périodiques) sans champ de vitesse moyen, le seuil R_{mc} croît lorsque P_m diminue (travaux de Schekochin), tandis qu'avec champ moyen, dans le cas d'un forçage Taylor-Green, le seuil augmente puis semble saturer. Ceci est confirmé par Y. Ponty, qui utilise un forçage Taylor-Green légèrement différent (à force constante *vs.* à énergie cinétique constante). Entre ces deux interventions, un consensus se dégage sur le fait que des modes de dynamos différents peuvent être observés, et qu'en plus des seuils, la structure des modes doit également être explorée attentivement. F. Plunian demande si la périodicité du code ne peut pas donner lieu à un effet α parasite (création d'un B à plus grande échelle que l'échelle de forçage). Y. ponty attire aussi l'attention sur le fait que v peut aussi avoir des contributions de plus grande échelle.

B. Dubrulle présente également l'approche théorique développée avec N. Leprovost, consistant à remplacer les fluctuations du champ de vitesse par un bruit stochastique ("à la modèle de Kraichnan"). De manière générale, pour une instabilité en présence de bruit multiplicatif, les seuils dépendent du choix du paramètre d'ordre : moyenne de B , de B^2 , moments d'ordre supérieurs, ... Il faut alors étudier les PDFs ou l'exposant de Lyapunov $2\Lambda = \frac{d\langle \ln B^2 \rangle}{dt}$. Les effets des fluctuations font apparaître des effets coopératifs des petites échelles qui peuvent être favorables (effet α), et des effets de désorientation du champ magnétique, l'écartant des directions propres.

B. Dubrulle montre des simulations de dynamos cinématiques champ Taylor-Green moyenné dans le temps plus bruit prescrit à grande ou à petite échelle, avec différentes corrélations temporelles. Les fluctuations à grande échelle semblent beaucoup plus défavorables, tandis que le bruit de petite échelle ne modifie presque pas les seuils. H.-C. Nataf fait alors remarquer que dans les simulations quasi géostrophiques de N. Schaeffer, au contraire, les ondes de Rossby sont nécessaires à la dynamo, le champ de vitesse moyenné temporellement ne donnant pas d'effet dynamo. De plus, M. Peyrot présente une étude d'instabilité de l'écoulement de Ponomarenko perturbé périodiquement. Selon la fréquence et le nombre d'onde de la perturbation, des résonances sont possibles, et les seuils peuvent augmenter ou diminuer. La conclusion de l'exposé est que l'optimisation des expériences doit non seulement porter sur l'écoulement moyen, mais également sur la partie non stationnaire et de grande échelle. F. Ravelet montre des mesures expérimentales caractérisant la transition à la turbulence dans l'écoulement contrarotatif de von Kármán, en particulier la prédominance dans les fluctuations des grandes structures de couche de mélange, dotées d'une dynamique chaotique sur des temps très longs. Enfin, dans le cas d'un effet α cinématique pour des champs de vitesses chaotiques exprimés analytiquement, A. Courvoisier montre par un travail analytique et numérique l'influence des temps de corrélation sur des trajectoires lagrangienne.

Enfin, Y. Ponty montre des études dynamiques dans le Taylor-Green avec champ magnétique extérieur imposé. Notons que cette situation peut permettre de mieux comprendre les expériences où un faible champ magnétique (terrestre) est toujours présent. Un résultat fort est que la dynamo peut alors apparaître de manière sous-critique. A bas R_m , le champ induit se comporte linéairement avec R_m , et une rupture dans le comportement, avec une croissance plus rapide avant une saturation est observée autour du seuil. Plusieurs questions se posent alors : cette "divergence de susceptibilité" peut-elle permettre de prévoir à quelle distance se trouve le seuil ? Comment varie le seuil avec le champ imposé ?