

GDR 2865 : « Structure de la turbulence et Mélange »

25 - 26 Novembre 2004

ESCPI, Paris

Organisateur local: Philippe Petitjeans

Thèmes abordés :

- Point sur les fluctuations globales d'énergie.

Animateur: Olivier Cadot

Compte-rendu par Alain Noullez

- Processus dynamique de cascade d'énergie et construction du spectre.

Animateur: Alain Noullez

Compte-rendu par Olivier Cadot

- Approches lagrangienne eulérienne.

Animateur: Jean-François Pinton

Compte-rendu par Nicolas Mordant

- La turbulence: que reste-t-il à faire? Quels sont les besoins pratiques? Où en sommes-nous (bilan de ce qui a été fait depuis 10 ans)?

Animateur: Yves Gagne

Compte-rendu par Yves Gagne

Les fluctuations globales d'énergie

Thème animé par Olivier Cadot

Le thème est introduit par une présentation générale du sujet effectuée par O. Cadot. Il rappelle que l'idée d'étudier les propriétés de la turbulence par le biais des fluctuations globales (intégrées sur tout le volume) de l'énergie a été introduite par A. Pumir dans des simulations numériques et expérimentalement par Labbé *at al.* Evidemment, dans la cas expérimental, on n'a pas accès à l'énergie totale de l'écoulement et on ne peut donc étudier que les fluctuations de la puissance "instantanée" injectée pour maintenir l'écoulement stationnaire. Deux modes de forçage sont fondamentalement possibles : on maintient la vitesse à grande échelle constante (et on a donc des fluctuations de couple et de puissance injectée), ce mode sera baptisé ici Ω , ou bien on maintient la force ou le couple à grande échelle constant (et on a donc des fluctuations de vitesse et de puissance injectée), ce mode sera baptisé ici Γ .

O. Cadot présente alors les résultats expérimentaux de mesures de puissance effectuées sur la "machine à laver", un écoulement entraîné par deux disques (avec pales) contrarotatifs dans un cylindre fermé de rapport d'aspect 1. Les disques peuvent être asservis en vitesse constante (mode Ω) ou en couple constant (mode Γ). Une remarque importante est que l'inertie des disques n'a pas d'importance en Ω alors qu'elle peut influencer le mode Γ . Le premier résultat important qui apparaît est que la distribution de probabilité de la puissance injectée P présente une skewness négative dans le mode Ω et positive dans le mode Γ . La salle se pose immédiatement d'expliquer la contradiction de ce résultat avec ceux obtenus par Labbé et Pinton (skewness positive dans le mode Ω). Comme l'expliquent alors Cadot et Pinton, les explications de ce désaccord peuvent être multiples : 1) les mesures de Lyon mesurent la puissance en retranchant la dissipation Joule dans les moteurs, dont l'évaluation est délicate et conduit à retrancher un terme quadratique RI^2 qui peut fausser complètement la skewness s'il est mal mesuré ; 2) le rapport d'aspect des manips est différents ; 3) le temps de réponse de l'électronique ; 4) le type d'asservissement des moteurs (en courant continu à Lyon, en courant haché au Havre). Quoi qu'il en soit, les mesures du Havre donnent clairement une skewness négative dans le mode Ω .

Les mesures montrent aussi que le taux de fluctuation de P_Ω est le double de celui de P_Γ . Ce facteur 2 ainsi que les signes opposés de la skewness sont expliqués par un petit modèle proposé par Tiron et Cadot dont les ingrédients essentiels sont : 1) la vitesse Ω diminue quand le freinage dû à la turbulence (mesuré en mode Γ) augmente ; 2) le couple de freinage turbulent est proportionnel à Ω^2 . Expérimentalement, on constate aussi que la skewness semble décroître en $\log(Re)$. Par ailleurs, le spectre temporel des fluctuations de P présente une puissance importante et des pics à basse fréquence qui indiquent de lentes réorganisations globales de l'écoulement. Ceci a aussi été constaté au CEA comme l'indique A. Chiffaudel qui signale que le simple ajout d'un anneau sur les parois modifie complètement les tourbillons à grande échelle (voir ci-après). J.-F. Pinton ajoute que la hauteur des pales peut changer l'écoulement global.

U. Frisch demande alors si on a observé des corrélations entre fluctuations de pression et de puissance injectée. O. Cadot répond que de telles mesures ont été

effectuées en utilisant une sonde de pression sur une paroi du cylindre et en effectuant des moyennes synchrones de P_Ω synchronisées sur les pics de dépression (donc les filaments). Un profil caractéristique de P_Ω émerge alors avec un pic positif suivi immédiatement d'un pic négatif (par rapport à la moyenne) légèrement plus intense (et qui produit la skewness négative) et synchronisé avec la détection du filament. L'écoulement "consomme" donc un peu plus de puissance pendant la "fabrication" du filament et en restitue lors de son explosion, le temps de vie des filaments étant de l'ordre de un temps de retournement.

B. Dubrulle présente alors un travail numérique sur un modèle de fluctuations globales de l'énergie dans le cas où le forçage en mode Γ est modélisé par un bruit rouge.

Le groupe du CEA représenté par F. Ravelet pose alors le problème de la stabilité et de la reproductibilité de l'écoulement dans la "machine à laver". En utilisant des disques à pales courbées, ils ont montré que la structure globale de l'écoulement est complètement modifiée selon que les pales "arrachent" (le fluide voit "(") ou "écrasent" le fluide (le fluide voit "("). En plus, le comportement de la dissipation totale avec le nombre de Reynolds n'est pas le même pour les deux modes systèmes de disques. Ils ont également observé que l'écoulement global effectue des transitions avec hystérésis entre des états où un seul des deux moteurs fournit toute la puissance pour maintenir le flot. Le système a donc trois états possibles, avec soit une seule cellule de circulation fixée sur un des disques, soit un état symétrique avec deux cellules sur la hauteur du cylindre, ce dernier état n'étant que marginalement stable. Les histogrammes de pression présentent donc aussi deux pics correspondant aux transitions entre les deux états asymétriques.

C. Cichowlas présente alors des mesures de distribution d'énergie globale ou de puissance dissipée/injectée dans des simulations numériques d'un vortex de Taylor-Green (configuration proche de la "machine à laver") effectuées avec M.E. Brachet. Les résultats sont en très bon accord avec ceux expérimentaux de O. Cadot mais sont en plus illustrés par des animations impressionnantes des spectres d'énergie instantanés qui montrent que celui-ci se comporte quasiment comme une corde vibrante sur laquelle se propagent des excitations qui se déplacent des grandes échelles (le forçage) vers les petites échelles (la dissipation).

A. Noullez présente alors rapidement les résultats de simulation numériques sur le problème de la distribution de probabilité de sommes de variables indépendantes mais non-équidistribuées. Le théorème de la limite centrale ne s'applique pas dans ce cas, mais une distribution gaussienne de la somme est cependant observée si la somme des variances des variables individuelles diverge avec le nombre de variables (comme c'est en fait le cas si les variables étaient équidistribuées). Si la somme des variances est convergente lorsque le nombre de variables tend vers l'infini (p.ex. si la variance de la variable k va comme k^β avec $\beta < -1$), la distribution de la somme n'est plus gaussienne, dépend de β et de la distribution des variables individuelles, mais est assez proche de la distribution de Gumbel qui reproduit assez bien la distribution des grandeurs globales observée expérimentalement.

D. Vincenzi présente alors un modèle simple pour décrire la dynamique d'un polymère dans un écoulement turbulent. En représentant le polymère par deux masses

séparées par un ressort et la turbulence par un champ de vitesse lisse en espace et décorrélé en temps, la distribution de probabilité des élongations du polymère a été obtenue et est contrôlée par le nombre de Weissenberg qui mesure le rapport entre le temps de Lyapounov pour la séparation des trajectoires de l'écoulement et le temps caractéristique d'amortissement du ressort représentant le polymère. Aux petits nombres de Weissenberg, le polymère garde une taille caractéristique fixée et reste "enroulé". Lorsque le nombre de Weissenberg devient supérieur à 1, le polymère se déploie et la distance entre ses deux extrémités croît sans limite si on se limite à une modélisation linéaire du ressort. Les prédictions de ce modèle très simple ont été confirmées par des simulations numériques de la distribution de taille de polymères transportés dans des simulations numériques d'un champ de vitesse Navier-Stokes 2-D (qui n'est donc pas décorrélé en temps !!).

Thème 2: Processus dynamique de cascade d'énergie et construction du spectre animé par Alain Noullez

Alain Noullez (Observatoire de la Côte d'Azur) pose la question de savoir comment se construit le spectre en $k^{-5/3}$ de la turbulence lorsque celle-ci est forcée à grande échelle. Comment pousse le spectre ? Plutôt des bas nombres d'ondes vers les grands nombres d'ondes ou alors de bas en haut simultanément sur toute la gamme de nombres d'ondes ? Il a étudié le problème dans le cas de l'équation de Burgers (Navier-Stokes 1D) résolu dans l'espace de Fourier. Il montre comment le terme non-linéaire produit d'autres fréquences que celles qui sont présentes dans le forçage. Il présente un scénario de construction du spectre, évident à basse fréquence mais plus difficile à interpréter à haute fréquence.

Dispose-t-on de données expérimentales sur la construction du spectre ? Sur ce point, Yannis Cuypers (ESPCI) présente ses travaux de thèse sur la construction du spectre pendant l'explosion d'un vortex étiré. Pendant la construction du spectre, il montre l'évolution de la pente qui converge vers $-5/3$ pendant l'explosion. Les mesures au fil chaud sont confirmées par des mesures PIV. Les données sont comparées au modèle de spirale de Lundgren: il montre comment l'explosion turbulente d'un vortex étiré évolue statistiquement comme la spirale de Lundgren.

Marc-Etienne Brachet (ENS Paris) présente deux travaux sur la simulation numérique des équations d'Euler. Le premier travail concerne la recherche de singularité à temps fini. Il fait suite à une recherche de singularité déjà réalisée sur le vortex de Taylor-Green mais qui n'avait pas fourni de résultat tranché. Son travail récent sur l'écoulement de Kida-Pelz, autre candidat à la singularité à temps fini, montre des oscillations. A part ces oscillations encore mal comprises l'étude montre qu'on ne peut toujours pas conclure sur l'existence de singularité à temps fini dans Euler. Le second travail concerne des lois d'échelles à la Kolmogorov qui sont observées dans les équations d'Euler tronquées à un certain nombre d'ondes. Lors de la construction du spectre de l'énergie cinétique on observe un rebond de l'énergie sur le nombre d'ondes de troncature, ce qui forme une loi de puissance en k^2 (ces modes sont thermalisés et l'énergie qu'ils contiennent correspond à de l'énergie dissipée). Aux faibles nombres d'ondes, on assiste à une relaxation du spectre vers une loi de puissance en $k^{-5/3}$. La loi de puissance de Kolmogorov ne nécessite donc pas de viscosité proprement dite se construire. Enfin Marc-Etienne Brachet souligne que cet effet de rebond sur l'échelle de troncature pourrait bien être observé dans le cas de la turbulence viscoélastique : ce sujet mériterait donc d'être étudié expérimentalement.

Uriel Frish (Observatoire de la Côte d'Azur) est le dernier à prendre la parole sur ce thème pour exposer un fait intéressant dont la théorie est en cours d'élaboration. Il s'agit de réalisations de mesures dans l'espace de Fourier à deux dimensions comme par exemple l'anisotropie. Les mesures, suivant les directions dans lesquelles elles sont réalisées dans l'espace de Fourier ne sont pas équivalentes. Les bonnes directions à prendre, sont celles dont le rapport des nombres d'ondes est rationnel.

GDR Turbulence

réunion des 25-26 novembre

compte rendu du thème "Lagrangien-Eulérien"

1 Nicolas Mordant (LPS - ENS Paris) – Mesures lagrangiennes d'accélération

Les mesures ont été effectuées dans le groupe de Eberhard Bodenschatz à Cornell University. L'écoulement étudié est de type Von Kármán entre deux disques contrarotatifs séparés d'un trentaine de centimètres. On éclaire par un laser pulsé un petit volume au centre de la cuve (4x4x2 mm³). On fait ensuite l'image de ce volume selon deux directions perpendiculaires et sur 4 détecteurs mesurant ainsi les 3 composantes de la position (fig. 1).

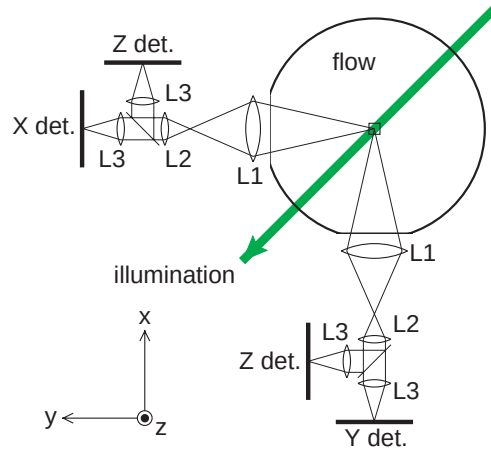


FIG. 1 – Coupe de la cuve dans le plan médian entre les deux disques

On obtient ensuite par double dérivation (et par filtrage passe-bas pour éliminer le bruit) le vecteur accélération et l'amplitude de l'accélération. La PDF d'accélération est très fortement non gaussienne avec des probabilités non négligeables d'observer des événements 40 fois plus intense que la variance d'accélération. La PDF de l'amplitude est relativement proche d'une distribution lognormale. En supposant le vecteur accélération isotrope, on montre que la distribution des composantes et la dépendance statistique entre composantes est également compatible avec une distribution lognormale de l'amplitude de l'accélération.

On s'intéresse également aux statistiques jointes de vitesse et d'accélération. La moyenne des composantes d'accélération conditionnée à une composante quelconque de l'accélération est nulle sauf pour $\langle a_z | u_z \rangle$. La variance de l'accélération dépend par contre fortement de la vitesse, variant de plus d'un ordre de grandeur. Un argument dimensionnel du type "Heisenberg-Kolmogorov" suggère une dépendance

$$\frac{\langle a^2 | u \rangle}{\langle a^2 \rangle} \sim \left(\frac{u}{\langle u^2 \rangle^{1/2}} \right)^{9/2}.$$

Un ajustement du type $\frac{\langle a^2 | u \rangle}{\langle a^2 \rangle} = \alpha + \beta \left(\frac{u}{\langle u^2 \rangle^{1/2}} \right)^{9/2}$ reproduit de façon très satisfaisante les variations observées (fig. 2).

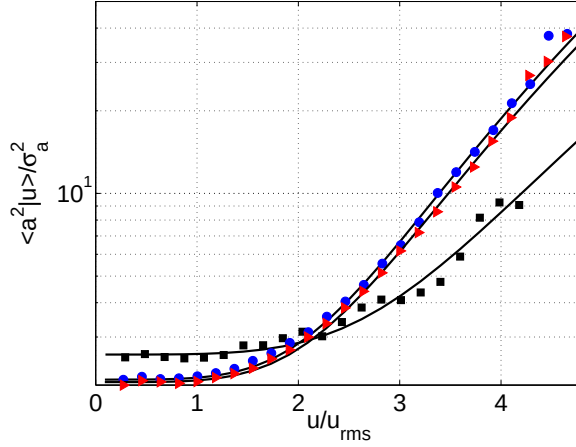


FIG. 2 – Variance d’une composante de l’accélération conditionnée à l’amplitude de la vitesse

A. M. Crawford, N. Mordant & E. Bodenschatz, Joint statistics of the Lagrangian acceleration and velocity in fully developed turbulence, *accepté pour PRL*

2 Laurent Chevillard (ENS Lyon) – analyse multifractale de la turbulence eulérienne et lagrangienne

On effectue une compilation de signaux expérimentaux eulériens (soufflerie Modane, jet d’Hélium, jet d’air, DNS) et lagrangiens (Von Karman, DNS) à divers nombre de Reynolds. On s’intéresse au phénomène d’intermittence qui peut être vu comme la déformation de la distribution des incréments de vitesse avec l’échelle (d’espace en eulérien ou de temps en lagrangien). A grande échelle, les PDF sont gaussiennes et se déforment continûment en développant des ailes de plus en plus larges lorsque l’échelle diminue. Une différence notable entre les PDF eulériennes et lagrangiennes est la non symétrie des premières qui présentent une skewness négative. On va décrire cette évolution dans le cadre du formalisme multifractal de Parisi-Frisch (1985) et l’approche du propagateur de Castaing et al (1990). On s’attachera en particulier à décrire les régimes dissipatif intermédiaire et dissipatif profond .

Les incréments de vitesse (eulériens) de vitesse à l’échelle l s’écrivent en loi de probabilité

$$\delta_l u(x) = \sigma \beta_l(x) \times \delta ,$$

où δ est un bruit blanc gaussien et les variables aléatoires intervenant dans le membre de droite sont indépendantes. Dans le régime inertiel, on a $\beta_l(x) = (l/L)^{h(x)}$, l’exposant h étant lui-même une variable aléatoire. La PDF de h est donnée par le formalisme multifractal, $\mathcal{P}_l(h) \sim (l/L)^{1-\mathcal{D}^E(h)}$ où $\mathcal{D}^E(h)$ est le spectre de singularités des profils spatiaux longitudinaux de vitesse eulérienne. On peut transposer directement le formalisme dans le cas lagrangien, c’est-à-dire $\beta_\tau(t) = (\tau/T)^{h(t)}$, où h est lui-même une variable aléatoire de densité $\mathcal{P}_\tau(h) \sim (\tau/T)^{1-\mathcal{D}^L(h)}$, $\mathcal{D}^L(h)$ étant assimilée dans la limite des échelle infiniment petite au spectre de singularités de la vitesse Lagrangienne . Dans la zone dissipative, on veut généraliser le formalisme et trouver le comportement de β_l et $P_l(h)$. L’échelle dissipative varie avec l’exposant h selon

$$\eta(h) = L \left(\frac{R_e}{R^*} \right)^{-1/(h+1)}$$

où $R^* \approx 56$. Il apparaît alors un exposant caractéristique donnant la limite entre les régimes dissipatif et inertiel $h^*(l/L, Re) = -1 - \frac{\ln(Re/R^*)}{\ln(l/L)}$ à l’échelle l . Dans le régime dissipatif les incréments de vitesse sont proportionnels à l’échelle puisque la vitesse est régulière et donc on obtient $\beta_l(h) = \frac{l}{L} \left(\frac{\eta}{L} \right)^{h-1}$ et $\mathcal{P}_l(h) \sim \left(\frac{\eta}{L} \right)^{(1-\mathcal{D}^E(h))}$. Encore une fois le formalisme se transpose naturellement dans le cas lagrangien.

On obtient alors la PDF des incréments de vitesse :

$$P_{\delta_l u}(\delta_l u) = \int dh \frac{1}{\beta_l(h)} P_l(h) P_{\delta_l u} \left(\frac{\delta_l u}{\beta(h)} \right)$$

pour laquelle on prend pour $h < h^*$ les expressions de $\beta(h)$ et $P_l(h)$ du régime inertiel et pour $h > h^*$ celles du régime dissipatif.

Il reste à définir le spectre singularité. On prend alors l'expression la plus simple possible

$$\mathcal{D}(h) = 1 - \frac{(h - c_1)^2}{2c_2}.$$

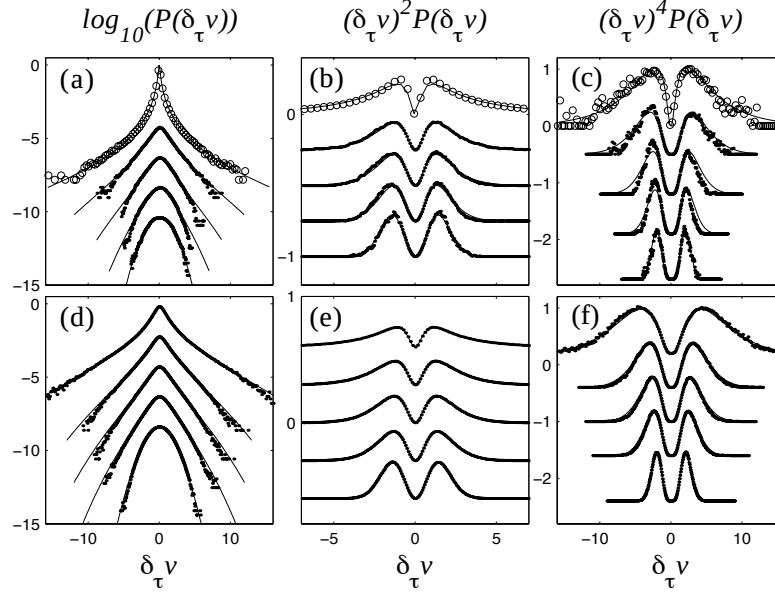


FIG. 3 – PDF des incréments temporels de vitesse pour des signaux lagrangiens expérimentaux (ligne du haut) et numériques (ligne du bas). Les courbes en traits plein correspondent au modèle. Voir références pour les détails.

On reproduit alors de façon quantitative les distributions observées avec $c_2^L = 0.08 \pm 0.05$ et $c_1^L = 0.58 \pm 0.05$ dans le cas lagrangien.

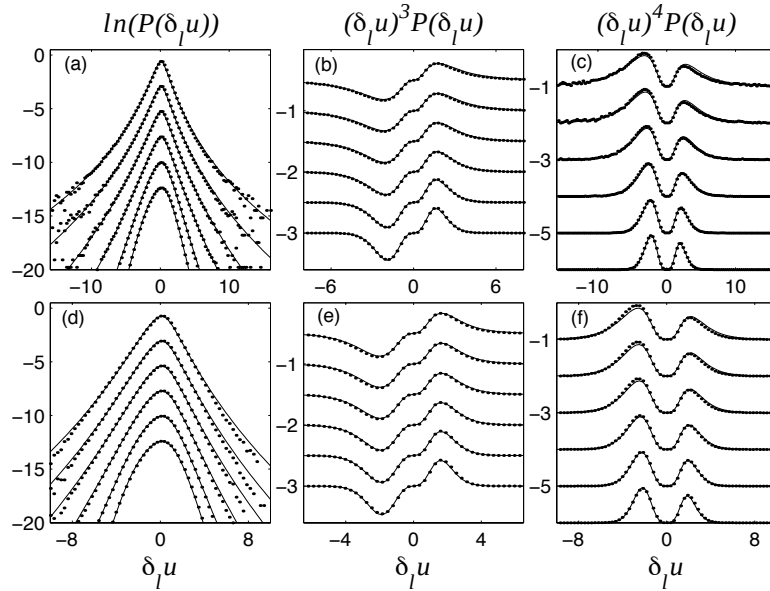


FIG. 4 – PDF des incréments spatiaux de vitesse pour des signaux eulériens expérimentaux (ligne du haut) et numériques (ligne du bas). Les courbes en traits plein correspondent au modèle. Voir références pour les détails.

Le modèle précédent ne prend pas en compte la skewness des PDF eulériennes. Pour cela on écrit que au sens des distributions $\delta_l u = \beta_l \Delta_l$ où β a été décrit précédemment. On effectue un développement de Edgeworth de la PDF P_{Δ_l} en une partie symétrique et gaussienne et une partie antisymétrique. On impose alors de devoir vérifier la relation de Kármán-Howarth et on obtient une valeur de la skewness $\frac{3\sqrt{2\pi}}{R^*} \approx 0.135$ qui reproduit assez fidèlement la valeur expérimentale de 0.14. En utilisant la forme parabolique du spectre de singularités

précédemment présentée, il est alors possible de décrire de manière quantitative les données eulériennes que nous avons à notre disposition avec $c_2^E = 0.025 \pm 0.03$ et $c_1^E = 0.37 \pm 0.05$.

L. Chevillard, S. G. Roux, E. Lévêque, N. Mordant, J.-F. Pinton & A. Arnéodo (2003), Lagrangian Velocity Statistics in Turbulent Flows : Effects of Dissipation, *Phys. Rev. Lett.* 91 , 214502

L. Chevillard, B. Castaing, E. Lévêque, On the Rapid Increase of Intermittency in the Near-Dissipation Range of Fully Developed Turbulence, cond-mat/0311409, (2003)

L. Chevillard, Description multifractale unifiée du phénomène d'intermittence en turbulence Eulérienne et Lagrangienne, Thèse de Doctorat. Disponible sur le net : [http ://tel.ccsd.cnrs.fr/documents/archives0/00/00/74/54/index_fr.html](http://tel.ccsd.cnrs.fr/documents/archives0/00/00/74/54/index_fr.html)

3 Philippe Gervais (LEGI - Grenoble) – Mesures lagrangiennes dans un jet d'air turbulent

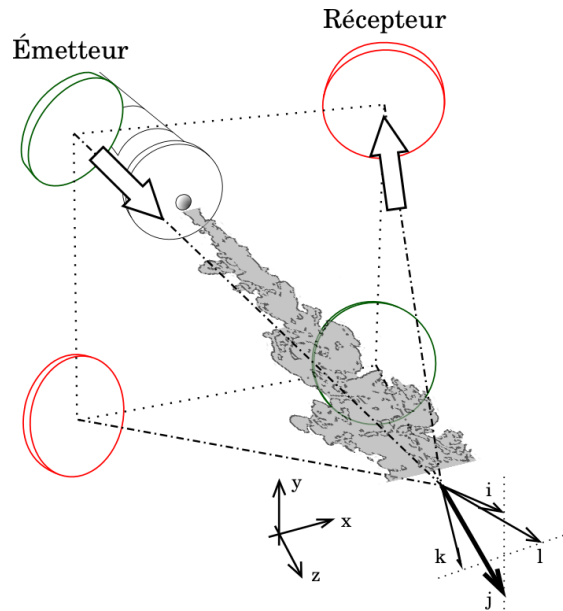


FIG. 5 – Dispositif expérimental

On cherche à effectuer des mesures lagrangiennes de vitesse dans un jet turbulent. Le dispositif expérimental est schématisé sur la figure 5. On dispose de deux émetteurs et deux récepteurs ultrasonores. On injecte des bulles de savon gonflées à l'hélium (de façon à ajuster leur densité effective à celle de l'air) dans le jet. Ces bulles diffusent les ultrasons et on extrait le décalage Doppler des signaux reçus pour obtenir la vitesse des bulles. En utilisant les quatre combinaisons émetteur/récepteur possibles (et deux fréquences d'émission), on mesure ainsi la projection du vecteur vitesse sur quatre vecteurs distincts à partir desquels on peut retrouver les trois coordonnées cartésiennes de la vitesse. La zone de mesure lagrangienne est l'intersection des quatre faisceaux acoustiques et englobe quasiment toute la section du jet.

Les densités de probabilité des trois composantes de vitesse sont présentées sur la figure 6. Les trois courbes sont proches d'une gaussienne autour de leur maximum et les écarts dans les ailes sont dues à des causes expérimentales. La densité de la composante axiale est comparée à la densité eulérienne prise par un fil chaud placé au centre de la zone de mesure. La valeur moyenne est plus faible du fait de l'inhomogénéité de la zone de mesure lagrangienne (explorée totalement par les bulles tandis que le fil chaud est fixe). De même la variance est légèrement différente. En étudiant la densité conjointe des deux composantes transverses de la vitesse, on observe que les deux composantes sont indépendantes statistiquement.

L'autocorrélation des trois composantes de vitesse – après compensation de l'inhomogénéité de la vitesse moyenne – est montrée sur la figure 7. Le temps caractéristique de la composante axiale est plus long que celui des composantes transverses. Les temps caractéristiques lagrangiens sont également plus long que le temps caractéristique de la vitesse eulérienne. Les autocorrélations lagrangiennes sont assez proches d'une décroissance

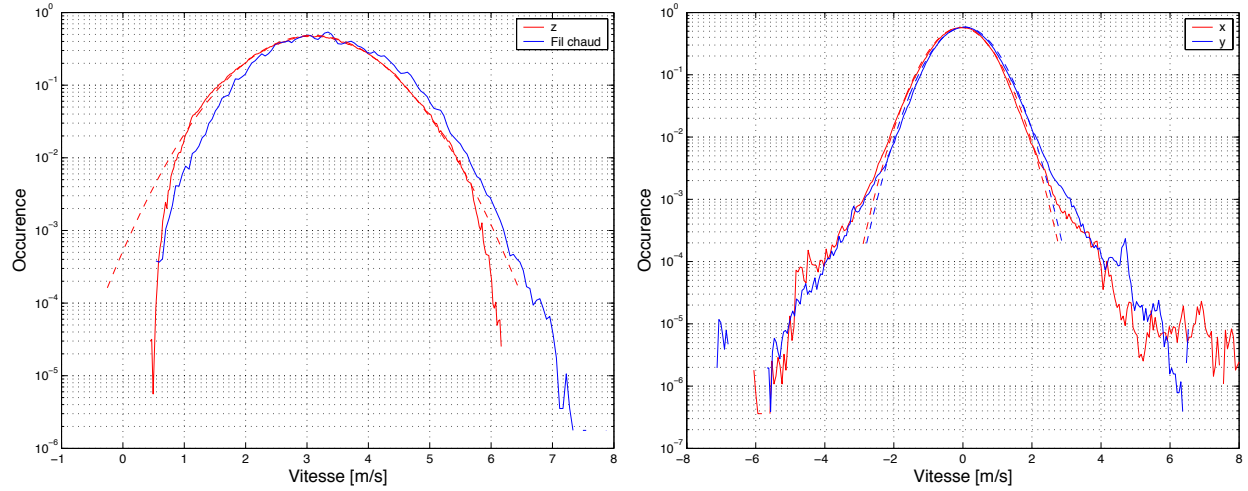


FIG. 6 – Densité de probabilité des composantes de vitesse axiale (à gauche) et transverses au jet (à droite). A gauche, la densité lagrangienne (rouge) est comparée à la densité eulérienne fournie par un fil chaud placé au centre de la zone de mesure.

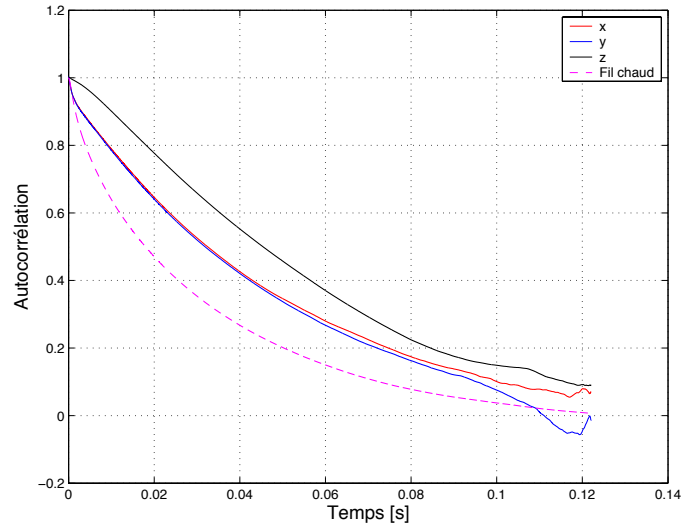


FIG. 7 – Dispositif expérimental

exponentielle. Finalement, en corrélant les signaux de vitesse lagrangienne axiaux avec celui du fil chaud placé à diverses positions en aval de la zone de mesure lagrangienne, on observe une corrélation temporelle. Le décalage temporel du maximum correspond au temps d'advection par l'écoulement moyen. Ces corrélations sont probablement dues aux structures à grand échelle du jet.

C. Poulain, N. Mazellier, P. Gervais, Y. Gagne, C. Baudet, Spectral vorticity and lagrangian velocity measurements in turbulent jets, *Flow, turbulence and combustion* 72 :245–271, 2004

4 Nicolas Lemoine (LPTP - Polytechnique) – Fonction caractéristique du déplacement turbulent dans un plasma magnétisé

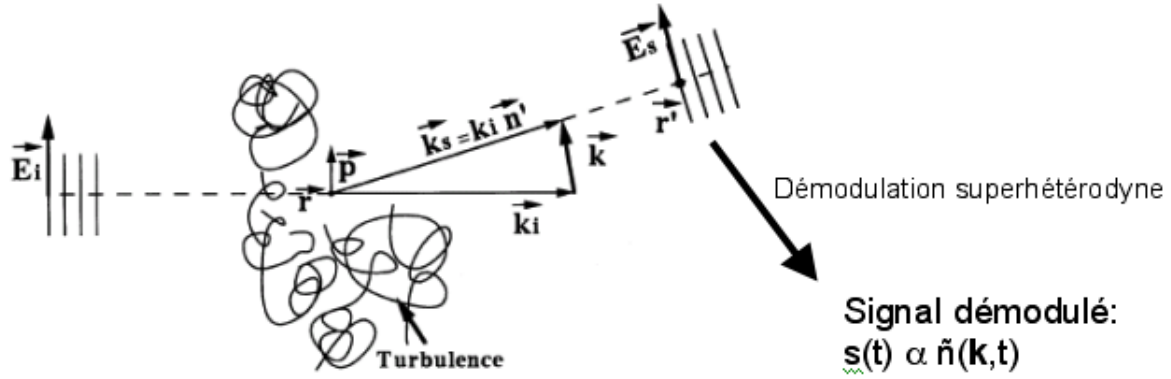


FIG. 8 – Principe

Par un dispositif de diffusion de la lumière d'un laser CO₂, nous avons accès à la transformée de Fourier spatiale des fluctuations de densité dans un plasma d'argon magnétisé. Ce signal est résolu en temps grâce à un dispositif de démodulation superhétérodyne. La fonction d'autocorrélation temporelle de ce signal peut être identifiée à la fonction caractéristique du déplacement, c'est-à-dire la transformée de Fourier de la distribution de probabilité du déplacement $P(\Delta, t)$:

$$C(k, t) = \langle e^{-ik \cdot \Delta(t)} \rangle = \int P(\Delta, t) e^{ik \Delta} d\Delta.$$

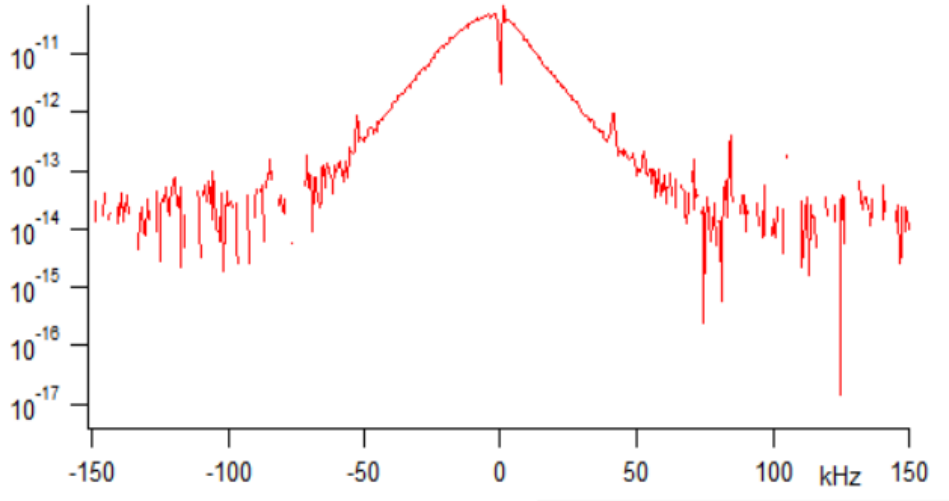


FIG. 9 – Densité spectrale du signal démodulé

Les expériences sont réalisées dans la machine ToriX¹ du LPTP. La densité spectrale typiquement obtenue après soustraction du bruit est représentée en fig. 9. A partir de celle-ci, on calcule la fonction d'autocorrélation du signal. De tels signaux sont enregistrés pour différents angles (donc pour différentes valeurs de k) lors d'expériences reproductibles.

Nous nous sommes demandé si $P(\Delta, t)$ était une gaussienne. Nous avons pour cela tracé $-\log C(k, t_0)$ en fonction de k , t_0 étant un paramètre (cf. fig. 10). Nous avons alors observé la chose suivante. Aux temps les plus courts (jusqu'à un peu moins de 5 μ s) on a bien une parabole (fig. 11). $P(\Delta, t)$ est alors bien une gaussienne.

¹ Les paramètres typiques de la machine et du plasma sont les suivants. Grand rayon du tore, $R=0.6$ m, petit rayon, $r=0.1$ m, densité, $n \sim 10^{17} \text{ m}^{-3}$, température électronique $T_e \sim 2$ eV, température ionique $T_i \sim T$ ambiante, champ magnétique toroïdal, $B_T < 0.36$ T, un champ magnétique vertical peut être ajouté ($B_V = 1.8$ mT) pour stabiliser le plasma. Le plasma d'argon est obtenu avec un filament de tungstène chauffé à blanc et mis à un potentiel négatif par rapport à la terre (-80 V).

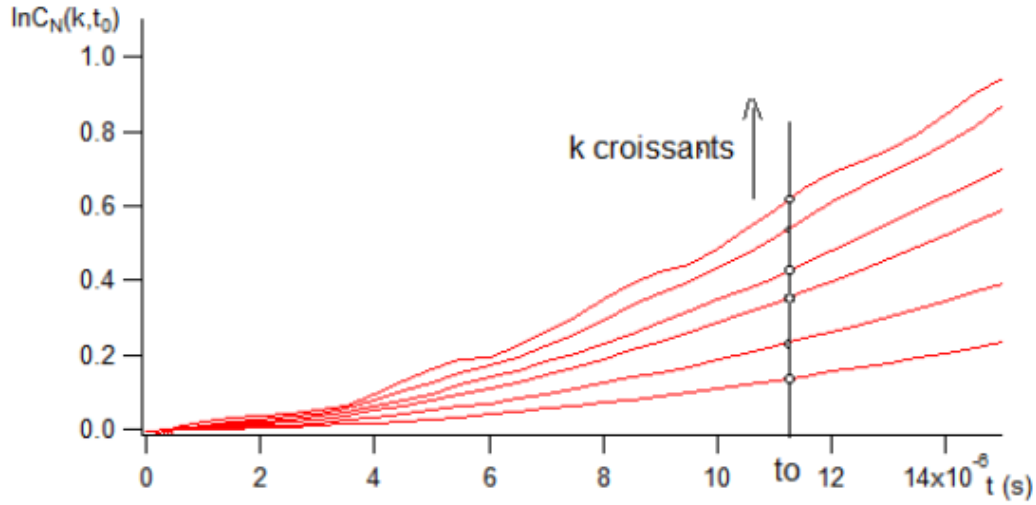


FIG. 10 – $\log C(k, t)$ pour différents k entre 800 et 1800 m^{-1} .

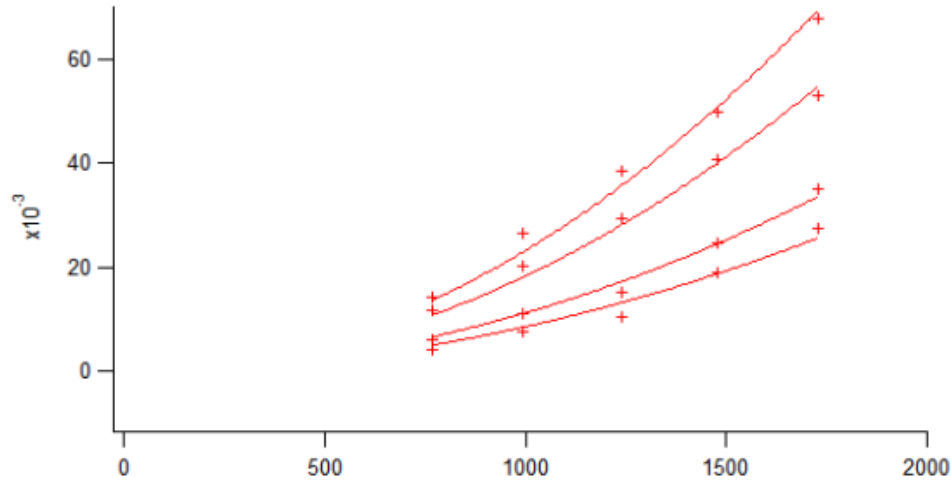


FIG. 11 – $\log C(k, t_0)$ pour $t_0 = 2, 2.5, 3.5$ et $4 \mu\text{s}$

On force le fit à passer par l'origine avec une pente nulle en 0. En effet la fonction d'autocorrélation normalisée vaut toujours 1 en zéro, quelque soit k et donc son log est toujours égal à 0. Pour ce qui est de la pente en zéro, elle est liée à l'existence d'un déplacement moyen qui est ici nul : les spectres expérimentaux sont bien centrés en zéro.

En revanche aux temps plus longs, on observe davantage une dépendance linéaire, la droite de régression ne passe pas par l'origine (fig. 12) mais laisse la possibilité d'une pente nulle à l'origine. La pente de ces droites est une quantité qui croît linéairement avec le temps t_0 . Une croissance linéaire de $\log C(k, t_0)$ signifie que la distribution de probabilité pour le déplacement devient plus large que la gaussienne. Si $\log C(k, t_0)$ était une droite pour toutes les valeurs de k , on aurait même une lorentzienne. Une interprétation de ces résultats en terme de vol ou de marches de Lévy est à l'étude.

Proceedings de l'ICPP, Nice, octobre 2004. <http://hal.ccsd.cnrs.fr/ccsd-00003149>

La diffusion collective de la lumière par les gaz turbulents, *Images de la physique* 2002 p. 14

Lévy Flights and Related Topics in Physics, Michael F. Shlesinger, George M. Zaslavsky, Uriel Frisch

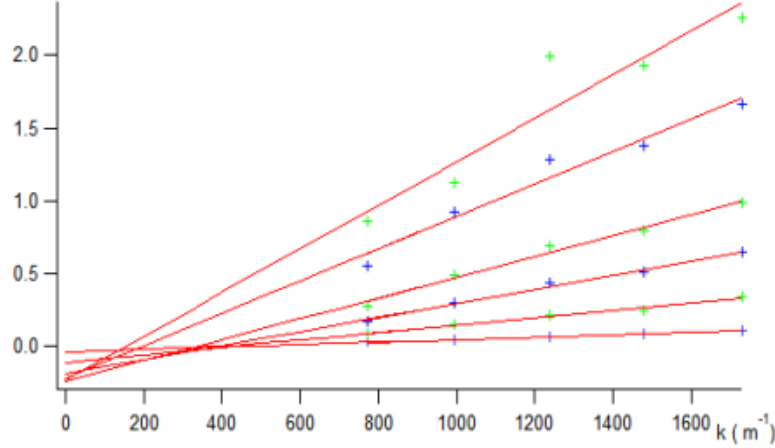


FIG. 12 – $-\log C(k, t_0)$ pour $t_0 = 5, 10, 15, 20, 30$ et $40 \mu s$

5 Aurélien Garcia (CORIA - Rouen) - Analyse lagrangienne du comportement du gradient d'un scalaire passif subissant des rotations et des déformations

La cascade d'un scalaire passif vers les petites échelles dépend fortement de la dynamique du gradient scalaire ∇q . En particulier, la topologie de l'écoulement joue un rôle important sur les propriétés d'orientation du gradient (Ashurst *et al.*). Dans les zones dominées par la déformation, le gradient tend à s'aligner avec la direction de compression et dans les zones dominées par la vorticité, le gradient est en rotation. En turbulence 2D, des simulations numériques montrent que le gradient s'aligne en fait avec des directions déterminées par la compétition entre la rotation effective et l'étirement (Lapeyre *et al.*).

Lapeyre *et al.* proposent un modèle de dynamique du scalaire. Ils obtiennent une équation d'évolution pour l'orientation du gradient en négligeant la diffusion :

$$\frac{d\zeta}{dt} = \sigma(r - \cos\zeta)$$

où $r = \frac{\omega + 2d\phi/dt}{\sigma}$. Dans l'équation ω est la vorticité, ϕ est la direction de compression et σ le taux de déformation. Dans les régions dominées par la déformation (régions hyperboliques : $|r| < 1$), ∇q converge exponentiellement vite vers la direction asymptotique $\zeta_- = -\arccos(r)$. Dans les régions dominées par la rotation effective (régions elliptiques : $|r| > 1$), on est amené à prédire une rotation continue du vecteur ∇q mais le gradient s'aligne avec l'orientation spécifique ζ_{prob} qui correspond au taux de rotation minimal. Ces conclusions ont été validées dans le cas d'une DNS de turbulence 2D par Lapeyre.

Dans la présente étude, on s'intéresse au cas d'une allée de Bénard-Von Kármán derrière un cylindre dans laquelle on injecte de la chaleur à l'aide d'une fine ligne source de chaleur située au centre de l'allée de tourbillon. On effectue une analyse lagrangienne de l'évolution du gradient du scalaire.

Dans cet écoulement laminaire, périodique et bidimensionnel, les champs de vitesse et de température sont mesurés localement et simultanément par référence de phase. La figure 13 représente un instantané des champs de température. A partir du champ de vitesse instantané, on calcule les trajectoires lagrangiennes des gradients de température par suivi numérique de particules fictives.

A partir des données lagrangiennes, on calcule les statistiques d'alignement du gradient de température avec les directions imposées par l'écoulement en fonction de la topologie de l'écoulement. Dans les régions hyperboliques (fig. 14), la distribution d'orientation du gradient dépend de la distance à la source. Proche de la source (fig. 14-a), la distribution de $\zeta - \zeta_-$ présente un maximum en 0 signifiant un alignement des gradients avec la solution asymptotique. La distribution de $\zeta - \zeta_c$ montre un alignement préférentiel du gradient ∇q dans une direction à $\pi/10$ de l'axe de compression. Cet alignement privilégié semble dû aux conditions particulières d'injection de la chaleur. La figure (fig. 14)-b) montre que les gradients du scalaire, en s'éloignant de la source de chaleur, perdent leur orientation privilégiée à $\pi/10$ de la direction compressionnnelle et tendent à s'aligner préférentiellement avec la direction compressionnnelle en contradiction avec les prédictions de Lapeyre.

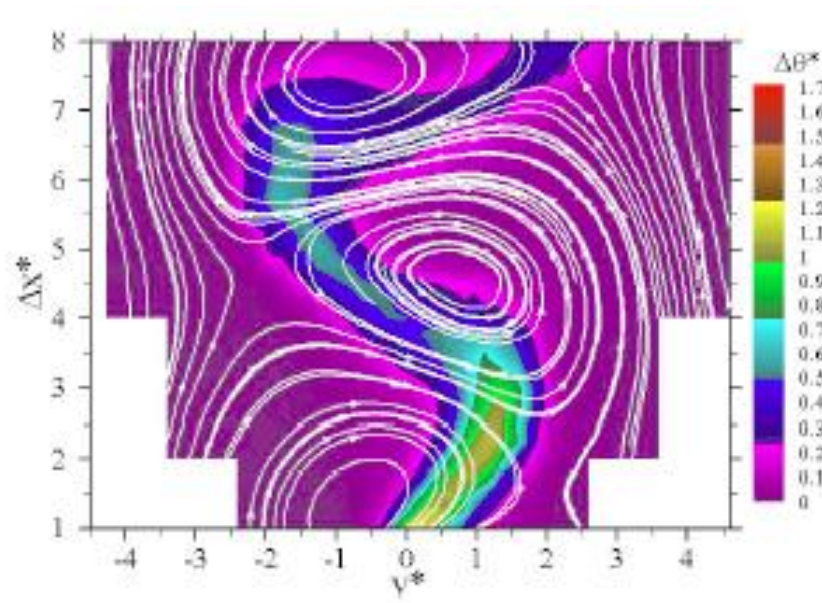


FIG. 13 – Instantané des champs de température (codée en niveaux de couleurs) et de vorticité (contours)- (Thèse de Godard G.)

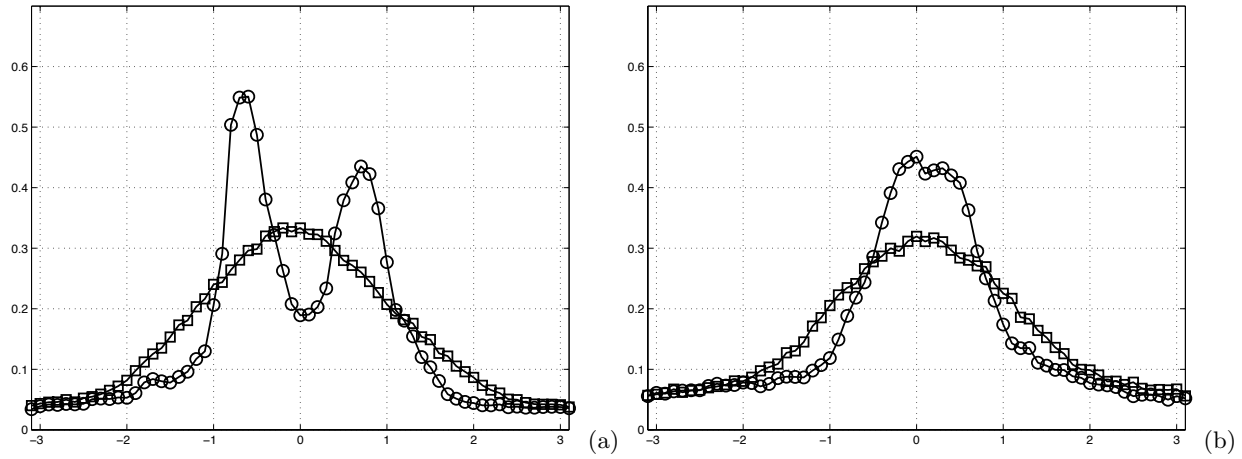


FIG. 14 – Distribution de l'orientation du gradient dans le cas hyperbolique. (a) : proche de la source. (b) : loin de la source. ○ $\zeta - \zeta_c$; □ $\zeta - \zeta_-$

Dans les zones elliptiques les distributions de $\zeta - \zeta_c$ et $\zeta - \zeta_{prob}$ sont equiprobables signifiant que les gradients n'ont pas d'alignement privilégié avec une direction particulière, à nouveau en contradiction avec le modélisation de Lapeyre *et al.*.

Godard G., *Etude expérimentale de la structure du champ d'un scalaire passif dans une allée de BVK*, thèse Université de Rouen (2001)

Ashurst, W.T and Kerstein, A.R and Kerr, R.M. and Gibson, C.H., Alignment of vorticity and scalar gradient with strain rate in simulated Navier-Stokes turbulence, *Phys. Fluids* **30**(1987)

Lapeyre, G. and Hua, B.L. and Klein, P., Dynamics of the orientation of active and passive scalars in two-dimensional turbulence, *Phys. Fluids* **13** (2001)

Lapeyre, G. and Klein, P. and Hua, B.L., Does the tracer gradient vector align with the strain eigenvectors in 2 D turbulence, *Phys. Fluids* **11** (1999)

6 Nicolas Mazellier (LEGI - Grenoble) – Mesures spectrales de vorticité

Les ultrasons peuvent être utilisés pour avoir accès à la vorticité. En effet une expérience de diffusion du son fournit les composantes spectrales de vorticité au vecteur d'onde de diffusion (déterminé par la géométrie de l'expérience et la fréquence des ultrasons). On peut ainsi étudier la dynamique de la vorticité dans l'espace spectral. Le vecteur d'onde étudié peut être modifié en changeant la géométrie de l'expérience (angle émission/réception) et/ou la fréquence d'émission. On s'intéresse ici à un jet rond turbulent d'air dont la buse a un diamètre d de 2,25cm.

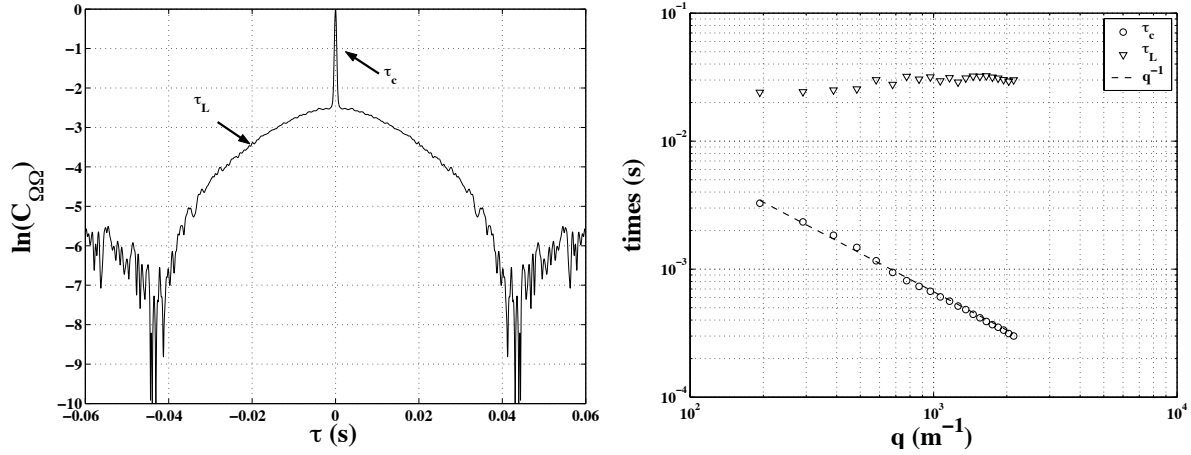


FIG. 15 – Autocorrélation temporelle d'une composante spectrale de vorticité (*gauche*) et évolution des deux temps caractéristiques(*droite*)

L'autocorrélation (temporelle) de la composante spectrale de vorticité contient deux temps caractéristiques (fig. 15). Ces deux temps ont une dépendance différente avec l'échelle d'analyse (fig. 15). Le temps court dépend fortement du vecteur d'onde et décroît en inverse du nombre d'onde : $\tau_c \propto q^{-1}$. Au contraire, le temps long est indépendant de l'échelle $\tau_L \propto q^0$. On peut dire qu'on observe un phénomène d'intermittence dans le sens où le comportement relatif de ces deux temps caractéristiques varie différemment avec l'échelle d'analyse.

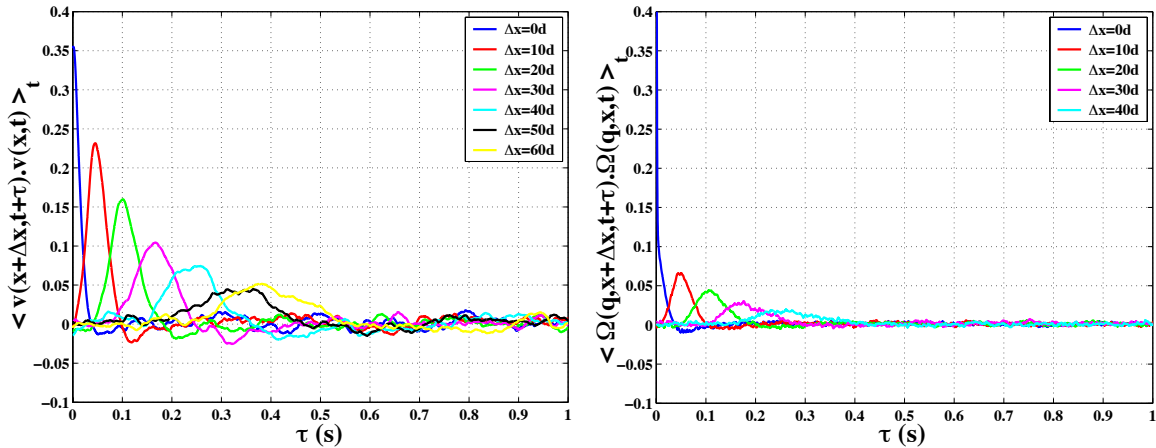


FIG. 16 – Intercorrélation spatio-temporelle. A gauche, cas de deux fils chauds, à droite cas de la vorticité.

On effectue également des mesures de corrélation spatio-temporelles en corrélant temporellement les signaux obtenus en plusieurs endroits du jet. Dans le cas de deux fils chauds placés à des distances différentes en aval du jet, on observe un pic de corrélation dont le décalage temporel est dû à l'advection par le jet et dont le maximum décroît avec la distance entre les fils (fig. 16).

Si l'on effectue le même type de mesure avec la vorticité en décalant les zones de mesure acoustique, on observe que la décroissance des pics est plus rapide suggérant une perte de mémoire plus rapide que pour la vitesse. Si l'on regarde de la même façon les interactions entre échelles, on remarque que la présence du temps caractéristique court disparaît dès que les zones de mesures sont légèrement décalées et que seule demeure

la dynamique la plus lente. Ceci suggère que la dynamique rapide (temps caractéristique court) est liée à un phénomène local tandis que la dynamique lente est non locale et liée à la cascade multiplicative.

Finalement, on peut extraire du signal de fil chaud un ersatz de dissipation en calculant le gradient. On retrouve alors la même dynamique temporelle que pour la vorticité avec la présence de deux temps caractéristiques. On observe aussi la disparition de la dynamique rapide dès que l'on étudie les corrélations spatio-temporelles. La dynamique aux temps longs est la même que celle de la vitesse.

7 Emmanuel Lévêque (ENS Lyon) – Quelle trace de l'irréversibilité temporelle dans les signaux lagrangiens ?

La trace de l'irréversibilité temporelle est bien connue dans le cas eulérien et est due à la relation de Kármán-Howarth. Elle se retrouve dans l'asymétrie des PDF des incréments longitudinaux de vitesse (eulérienne). Par contre les PDF des incréments temporels de vitesse lagrangienne sont symétriques et il faut chercher ailleurs la trace de l'irréversibilité temporelle. N. Mordant a observé que les PDF des incréments temporels du carré de la vitesse (énergie cinétique de la particule) sont légèrement asymétriques mais la qualité des signaux expérimentaux est insuffisante pour en tirer une certitude.

Dans la recherche d'une relation analytique, on est aidé dans le cadre eulérien par le fait que la vitesse et le gradient de pression ne sont pas corrélés. Au contraire, dans l'approche lagrangienne, le terme de pression est la composante principale de l'accélération et pilote tout. Il sera alors peut-être plus fructueux de chercher une équation impliquant la vorticité et la vitesse en s'appuyant par exemple sur une équation du type

$$\frac{3}{2} \frac{\langle \delta \omega(\tau)^2 \rangle}{d\tau} = -\langle \omega(x, t|t + \tau) \cdot (\omega(x, t|t) \cdot \nabla) u(x, t|t) \rangle$$

Si l'on regarde les corrélations temporelles, accélération/vitesse pour une particule de fluide donnée (en x à l'instant t) on a

$$\frac{3}{2} \frac{\langle \delta v(\tau)^2 \rangle}{d\tau} = -\langle u(x, t|t + \tau) \nabla p(x, t) \rangle + \nu \langle u(x, t|t + \tau) \Delta u(x, t) \rangle.$$

On observe dans des simulations numériques (DNS) que le terme visqueux est toujours négatif. Il correspond au taux de dissipation moyen pour $\tau = 0$ puis croît de façon monotone vers 0. Le terme de pression a une dynamique plus complexe. A temps nul, il est nul montrant que dans la DNS, le terme de pression ne travaille pas et c'est la force d'entraînement des grandes échelles (forçage, non écrit dans l'équation ci-dessus) qui compense la dissipation. Puis le terme de pression croît rapidement sur un temps de l'ordre du temps de Kolmogorov pour décroître plus lentement vers 0 selon une loi a priori plus complexe qu'une simple décroissance exponentielle.

A défaut de relation analytique, on se limite à une approche phénoménologique. On veut séparer les contributions de la dynamique liées au travail des forces de celles liées à la rotation. Pour cela on projette les incréments temporels de vitesse lagrangienne sur un vecteur "tangent"

$$\delta v_{//}(\tau) = \delta \mathbf{v}(\tau) \cdot \mathbf{T}(\tau)$$

avec $\delta \mathbf{v}(\tau) = \mathbf{v}(t + \tau) - \mathbf{v}(t)$ et $\mathbf{T}(\tau) \propto \int_t^{t+\tau} \mathbf{v}(s) ds$. Dans la limite τ tendant vers 0, $\mathbf{T}$ tend vers le vecteur tangent à la trajectoire et $\frac{\delta v_{//}}{\tau} \rightarrow \dot{s}$ ou s est l'abscisse curviligne. On peut définir un incrément transverse de vitesse $\delta v_{\perp}(\tau) = \|\delta \mathbf{v}(\tau) - \delta v_{//}(\tau) \mathbf{T}(\tau)\|$ qui tend vers l'accélération centrifuge quand τ tend vers 0.

On utilise des données issues de DNS pour observer le comportement de ces deux quantités. La distribution de $\delta v_{//}$ est asymétrique avec une skewness négative. Le moment d'ordre 3 évolue avec l'échelle temporelle τ (fig. 17). Aux petits temps, le comportement est régulier avec une évolution en τ^3 puis on observe une transition vers un comportement linéaire en τ dans un régime inertiel. Pour étudier de façon plus fine l'évolution des distributions avec l'échelle, on calcule le cumulants d'ordre 2 des incréments de vitesse (fig. 18). On observe que le cumulants de l'incrément de vitesse parallèle varie moins fortement que l'incrément transverse. En particulier, la forte croissance observée quand τ diminue est observée pour des valeurs de τ plus élevées pour $\delta v_{\perp}$ que pour $\delta v_{//}$. L'influence de la rotation se fait sentir pour des échelles plus élevées sur la partie transverse des incréments de vitesse et elle occulte alors les effets balistiques.

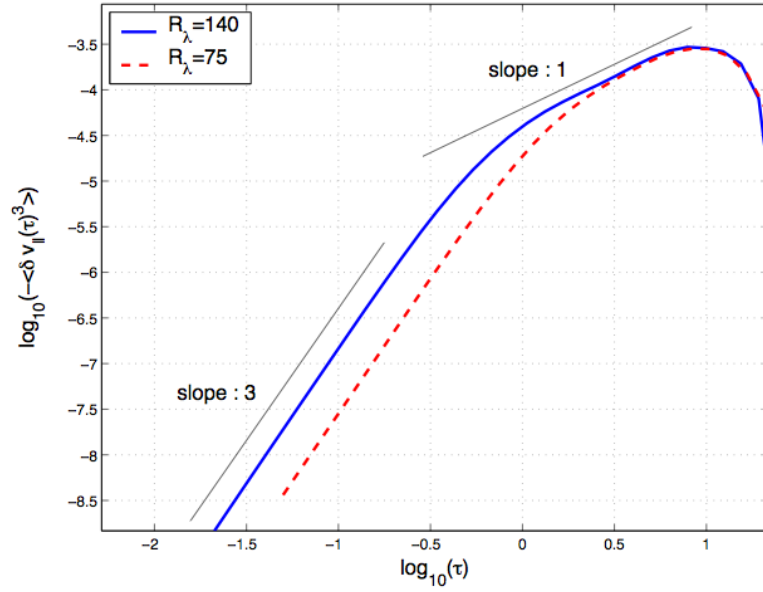


FIG. 17 – Evolution de la skewness de $\delta v_{//}$ avec l'échelle

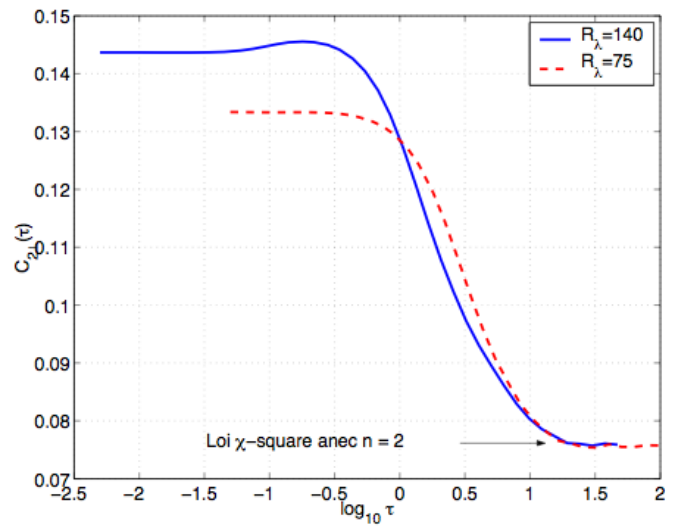
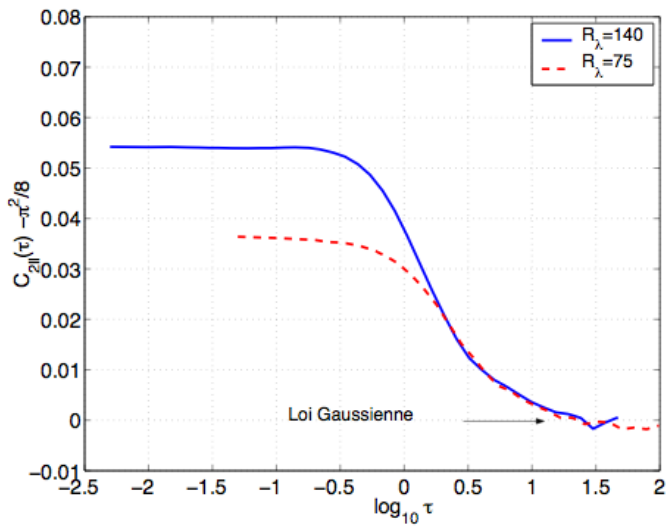


FIG. 18 – Evolution des cumulants des incréments de vitesse avec l'échelle. A gauche incréments longitudinaux, à droite incréments transverses.

Thème 4: **La turbulence: que reste-t-il à faire? Quels sont les besoins pratiques? Où en sommes- nous (bilan de ce qui a été fait depuis 10 ans)?**

1 – Où en sommes-nous ?

Faute de temps, il n'a pas été possible d'organiser une discussion structurée sur la contribution globale du GDR 'Turbulence' après une dizaine d'années d'existence.

La seule remarque évidente, en guise de bilan, concerne La Turbulence Homogène et Isotrope .

La T H I a été la thématique centrale du GDR. Ce thème s'est naturellement (?) imposé comme dénominateur commun aux communautés 'physique' et 'mécanique', deux aspects ont été particulièrement développés :

- Cascade Intermittente :
Nombreux résultats obtenus sur la déformation des pdf des valeurs absolues des incréments de vitesse lorsqu'on descend dans les échelles.
En revanche, quasiment rien sur l'évolution correspondante de leur disymétrie.... (les "Normal Inverse Gaussian distribution" sont-elles une nouvelle piste...)
- Importance des "Grandeurs Globales" :
Au fil du temps, les études ont révélé que la dynamique à petite échelle porte peu (champ de vitesse) ou prou (champ scalaire) la signature de la grande échelle, aussi grand soit le nombre de Reynolds.
Ce résultat majeur (influence définitive des Grandes Echelles, importance des interactions non locales, existence d'échelle caractéristique,...,quelque soit la valeur de Re) constitue une remise en cause de la manière dont on utilise implicitement la phénoménologie de Kolmogorov :

Question qui se pose alors :

Faut-il abandonner l'idée de considérer qu'à Reynolds suffisamment grand, la T H I peut être vue , au plan statistique, comme "modèle universel (?) à petite échelle" des écoulements turbulents réels.

Corrélativement, au plan des structures, est-il crucial d'identifier des formes génériques de tourbillons entre la forme dite "spirale" (primaire de Kelvin-Helmoltz) et celle dite "longitudinale" (filaments vortex de la T H I).

2 – Quels sont les besoins ? Que faire ?

A-t-on les compétences pour discuter valablement au sein de ce GDR des besoins industriels actuels en turbulence : réduction de traînée, diminution du bruit, amélioration du mélange, écoulements instationnaires, contrôle d'écoulement, etc... ?

Faute d'une discussion collective, qu'il semble pourtant nécessaire d'avoir prochainement, notamment en ce qui concerne :

- Modélisation sous maille en Simulation Grande Echelle (Apport de la paramétrisation stochastique , Modèle basé sur une équation de Langevin généralisé,...)
- Effet 2D ou non d'un champ extérieur (MHD, EMHD, Rotation, Stratification,
- Ecoulements Géophysiques à grand Reynolds
- Ecoulements Diphasiques
- etc...

Afin d'initier une future discussion d'orientation scientifique, sont regroupées ci-après, les résumés de présentation/discussion/suggestion de quelques intervenants.

QUELQUES RÉFLEXIONS SUR TURBULENCE, INTERMITTENCE ET GÉOPHYSIQUE, LES ENJEUX ASSOCIÉS POUR LE NOUVEAU GDR

DANIEL SCHERTZER,

CEREVE, ENPC, 77455 Marne-la-Vallée Cedex 2 , Daniel.Schertzer@cereve.enpc.fr
et Météo-France, 75007, Paris, France

1 Remarques générales

Le terme ‘multifractal’, apparu il y a à peine vingt ans [*Benzi et al.*, 1984 ; *Parisi and Frisch*, 1985], se forgea au cours de débats relativement théoriques sur l’intermittence en turbulence hydrodynamique [pour revue *Gagne et al.*, 1989 ; *Frisch*, 1995 ; *Mandelbrot*, 1999], Ce débat fut initialement considéré comme un débat de spécialistes de la turbulence, malgré le fait qu’il eut parfois des liens directs avec la dynamique de l’atmosphère [*Schertzer and Lovejoy*, 1984 ; *Schertzer and Lovejoy*, 1985a ; *Meneveau and Sreenivasan*, 1987 ; *Schmitt et al.*, 1996] et même les précipitations [*Schertzer and Lovejoy*, 1987]. Le divorce entre turbulence et géophysique a pu être entretenu, pour une part, par la coexistence pendant une certaine période de deux GDR distincts : l’un sur la mécanique des fluides géophysiques et astrophysiques, l’autre sur l’intermittence de la turbulence en laboratoire ou en simulation numérique. Cela a pu en effet contribuer à renforcer l’idée (l’illusion ?) qu’il fallait d’abord résoudre le problème de l’intermittence dans le cas le plus simple et le plus « pur », celui de la turbulence homogène et isotrope (THI), essentiellement dynamique et limitée au scalaire passif. Donc, négliger, voire rejeter, l’importante source de données turbulentes que représente la « géophysique fluide », sous différentes formes.

Cependant, quelques collaborations fructueuses¹ entre les deux communautés, ont permis un changement radical de paradigme pour la géophysique [par ex. *Sivapalan*, 2003]: l’extrême variabilité des champs géophysiques sur une grande gamme d’échelle, si souvent constatée et si souvent déplorée, est devenue maîtrisable à l’aide de notions de cascade multiplicative généralisées à des cas fortement anisotropes et à des scalaires fortement actifs. Ce bouleversement ne se limite plus aux problèmes fondamentaux et théoriques de la géophysique, mais atteint maintenant des niveaux très applicatifs (cf. sect. 3). Réciproquement, des données géophysiques ont permis de poser quelques questions fondamentales sur l’intermittence, y compris dans le cadre de la THI.

La question est donc posée de trouver la meilleure solution pour développer de façon significative cette collaboration. Dans cette perspective, on peut distinguer:

- des objectifs généraux,
- des objectifs de la turbulence non HI (TnHI).

¹ Par ex ; l’atelier du GDR Mécanique des Fluides Géophysiques et Astrophysiques : l’impact des données sur les théories de la turbulence (compte-rendu publié dans *Nonlinear Processes in Geophysics* 3,4 (1996)).

2 Objectifs généraux (THI et TnHI)

2.1 Quelle universalité ?

On s'est en général contenté de vérifier une certaine universalité pour les exposants des moments statistiques d'ordre relativement modéré. Cette vérification est peu significative car de façon générale un modèle multifractal peut être défini à l'aide de seulement trois paramètres. On a donc souvent ajusté ces paramètres [Schmitt *et al.*, 1992 ; She and Leveque, 1994; She and Waymire, 1995] sur le comportement assez moyen du champ (en gros ses trois premiers moments) et non sur ses extrêmes, la caractéristique la plus intéressante de l'intermittence. C'est effectivement au niveau des ordres statistiques très faibles ou très élevés que les différences deviennent très sensibles pour les différents modèles théoriques (cf. sect. 2.2) et correspondent à des hypothèses théoriques radicalement différentes [Schertzer *et al.*, 1995].

Au plan théorique, relativement peu d'efforts ont été consacrés à caractériser différents types d'universalité, dépendant de propriétés assez générales, telles que continuité des échelles, type de conservation des invariants, ergodicité ou non, robustesse des exposants dans le cas de mélange de turbulence de même type [Schertzer and Lovejoy, 1987; Schertzer and Lovejoy, 1997], etc.

2.2 Quels extrêmes ?

Cette question est décisive pour de multiples applications, particulièrement en géophysique pour le calcul des temps de retour des événements extrêmes [ex. Duband *et al.*, 1988]. En dépit de son importance socio-économique, que diverses catastrophes naturelles nous rappellent régulièrement, peu d'efforts ont été consacrés à éclaircir la question fondamentale de savoir si les queues des lois de probabilité sont de type exponentiel (suivant le « bon sens » usuel et certains modèles de cascade) or de type loi de puissance (suivant d'autres modèles de cascade [Schertzer and Lovejoy, 1992]). Une estimation empirique satisfaisante, i.e. évitant des biais artificiels, de ces moments requiert à la fois de grands nombres de Reynolds et de grands échantillons. Les données géophysiques sont intéressantes pour cela et ont été probablement sous-exploitées [Van Atta, 1996 ; Anselmet *et al.*, 2001].

2.3 Quelle prédictibilité ?

Le caractère multifractal de l'intermittence n'a guère été utilisé [Schertzer and Lovejoy, 2004b] jusqu'ici pour analyser la prédictibilité des écoulements turbulents, alors que ni les « fermetures analytiques » de la turbulence [Lorenz, 1969; Leith, 1971; Leith and Kraichnan, 1972 ; Métails and Lesieur, 1986], ni « l'effet papillon » [Lorenz, 1963] des attracteurs étranges ne peuvent rendre compte de son extrême variabilité spatiale et temporelle [Lilly, 1985]. Pour autant quelques observables relativement simples ont été mis en évidence [Schertzer and Lovejoy, 2004a] et il conviendrait de les tester empiriquement dans des modèles numériques, comme sur des bases de données géophysiques.

2.4 Quel mode de prévision ?

Pendant de nombreuses années, les modèles de prévision numérique ou de simulation du climat ont été développés dans un cadre purement déterministe, notamment en ce qui concerne leur paramétrisation sous-maille. Cette orientation a été récemment remise en cause dans les milieux mêmes de la prévision numérique (ex. : CEPMMT²) en constatant empiriquement ses limites. Une nouvelle orientation est en plein développement : celle d'une prévision probabiliste [Toth and Kalnay, 1993 ; Houtekamer *et al.*, 1996; Molteni *et al.*,

² Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme.

1996]et de paramétrisations stochastiques [Buizza *et al.*, 1999]. Actuellement, cette orientation s'est traduite d'une part par des prévisions d'ensemble obtenues par N simulations déterministes à partir d'une même situation initiale perturbée aléatoirement et d'autre part par des perturbations aléatoires des paramètres des actuelles modélisations (déterministes) sous-maille. Il commence à être compris [Palmer, 2000] qu'il faut aller bien au-delà de ces premières tentatives relativement ad hoc, et considérer ainsi des prévisions stochastiques et des paramétrisations stochastiques à base physique. On peut noter que des prévisions multifractales commencent à se développer dans le cadre des prévisions à très court terme, dites « prévisions immédiates » [Marsan *et al.*, 1996 ; Seed, 2002].

Ce changement de paradigme ouvre un très large champ d'application aux modélisations multifractales, pour autant que celles-ci se développent hors du cadre trop académique de la THI.

3 Objectifs TnHI :

La turbulence géophysique est profondément anisotrope, pour la simple raison que la gravité intervient à toute échelle. Le fait que la communauté turbulente a trop longtemps tenté d'enfermer la turbulence géophysique dans un cadre HI peut partiellement expliquer une certaine désaffection de communautés géophysiques de toute problématique turbulente. En particulier la turbulence proprement dite (i.e. non 2D) était réduite aux échelles inférieures à 10 km. Des questions similaires peuvent se poser par rapport au trop académique scalaire passif.

Il semble ainsi que quatre questions méritent probablement un certain intérêt et sont susceptibles d'interactions fructueuses avec des programmes tels que PNRH³ et PATOM⁴ de l'INSU/SDU⁵ :

3.1 Quelle anisotropie verticale/horizontale ?

À l'opposé du traditionnel schéma de la turbulence atmosphérique [Monin, 1972 ; Pedlosky, 1979] THI en petits morceaux des années 70 (quasi-2D pour les grandes échelles/trou de méso échelle/ quasi-3D pour les petites échelles), un grand nombre d'expériences géophysiques (avions [Gage, 1979; Lilly and Paterson, 1983; Chigirinskaya *et al.*, 1994; Lindborg, 1999 ; Lovejoy *et al.*, 2004], ballons-sondes [Endlich *et al.*, 1969; Adelfang, 1971; Schertzer and Lovejoy, 1985a; Lazarev *et al.*, 1994; Lovejoy *et al.*, 2004], radiances satellitaires [Lovejoy *et al.*, 2001a], lidar embarqué [Lilley *et al.*, 2004b]) ont plutôt mis en évidence un unique régime fortement anisotrope des plus petites échelles, jusqu'aux échelles planétaires. Au point que K. Gage (NOAA) a pu déclarer :« plus personne de sérieux ne peut croire au trou de méso échelle », contrairement au célèbre spectre de [Van der Hoven, 1957] ! Il est à noter que la dite approximation de Boussinesq semble incompatible avec ces résultats, existe-t-il une approximation compatible ? Dans cette perspective, quel est le domaine de pertinence du modèle le plus simple basé sur cette anisotropie, i.e. un modèle auto-affine [Schertzer and Lovejoy, 1985b]?

3.2 Quelle anisotropie temps/espace ?

Les mêmes questions se posent pour cette autre anisotropie [Schertzer *et al.*, 1997 ; Deidda, 2000 ; Lovejoy *et al.*, 2001b].

³ Programme National de Recherche en Hydrologie.

⁴ Programme Atmosphère et Océans Multi-échelles.

⁵ Institut National des Sciences de l'Univers / Section Sciences de l'Univers (CNRS).

3.3 Quels comportements turbulents des scalaires actifs ?

Cette question est particulièrement importante pour la partie atmosphérique du cycle de l'eau. En effet, de nombreuses études mettent en évidence un comportement multifractal assez universel des précipitations et des nuages sur une grande gamme d'échelle d'espace et de temps [pour revue *Lovejoy and Schertzer*, 1995]. En particulier, il a été mis en évidence pour les gouttes de pluie l'absence d'une gamme d'échelle [*Lovejoy et al.*, 2003 ; *Lilley et al.*, 2004a] avec un comportement relativement « lisse », et par contre une liaison forte avec la dynamique à toute échelle. Des éléments similaires commencent à être mis en valeur pour l'ozone et d'autres composants chimiques [*Tuck et al.*, 2003].

Au-delà de ces constats, quels éléments peut-on dégager pour des modélisations « réalistes » pour le « changement global », la qualité de l'air?

3.4 Quels comportements turbulents des particules biologiques?

Des comportements multifractals ont aussi été mis en évidence pour le phytoplancton et le zooplancton [*Seuront et al.*, 1996; *Marguerit et al.*, 1997; *Abraham*, 1998 ; *Currie et al.*, 1998; *Seuront et al.*, 1999; *Lovejoy et al.*, 2001b] dans les océans, estuaires, lacs et rivières. Quelles modélisations réalistes, notamment pour la gestion des lacs [*Vinçon-Leite et al.*, 2002; *Oberhaus et al.*, 2003], ou le cycle du carbone, peuvent en rendre compte?

Bibliographie

- Abraham, E., R., The generation of plankton patchiness by turbulent stirring, *Nature*, 391, 577-580, 1998.
- Adelfang, S.I., On the relation between wind shears over various intervals, *Journal of Atmospheric Sciences*, 10, 138, 1971.
- Anselmet, F., R.A. Antonia, and L. Danaila, Turbulent flows and intermittency in laboratory experiments, *Planetary and Space Science*, 49, 1177-1191, 2001.
- Benzi, R., G. Paladin, G. Parisi, and A. Vulpiani, On the multifractal nature of fully developed turbulence, *Journal of Physics A*, 17, 3521-3531, 1984.
- Buizza, R., M.J. Miller, and T.N. Palmer, Stochastic Simulation of Model Uncertainties in the ECWMF Ensemble Prediction System, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 125, 28887-2908, 1999.
- Chigirinskaya, Y., D. Schertzer, S. Lovejoy, A. Lazarev, and A. Ordanovich Unified multifractal atmospheric dynamics tested in the tropics, part I: horizontal scaling and self organized criticality, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 1 (2/3), 105-114, 1994.
- Currie, W.J.S., M.R. Claereboudt, and J.C. Roff, Gaps and patches in the ocean: a one-dimensional analysis of planktonic distributions, *Marine Ecol. Prog. Ser.*, 171, 15-21, 1998.
- Deidda, R., Rainfall downscaling in a space-time multifractal framework, *Water Resour. Res.*, 36, 1779-1794, 2000.
- Duband, D., M. C., H. Garros, and J. Astier, Estimating Extreme Value Floods and the Design Flood by the Gradex Method, in *CIGB 16eme Conference*, Q63, R60, San Francisco, 1988.
- Endlich, R.M., R.C. Singleton, and J.W. Kaufman, Spectral Analyses of detailed vertical wind profiles, *Journal of Atmospheric Sciences*, 26, 1030-1041, 1969.
- Frisch, U., *Turbulence: The Legacy of A. N. Kolmogorov*, 296 pp., Cambridge University Press, Cambridge, 1995.
- Gage, K.S., Evidence for $k^{-5/3}$ law inertial range in meso-scale two dimensional turbulence, *Journal of Atmospheric Sciences*, 36, 1979, 1979.

- Gagne, Y., E. Hopfinger, and U. Frisch, *New trends in Nonlinear Dynamics and Pattern Forming phenomena: The geometry of nonequilibrium*, Plenum Press, New-York, 1989.
- Houtekamer, P., L. Lefaivre, J. Derome, H. Ritchie, and M. H., A system simulation approach to ensemble prediction, *Monthly Weather Review*, 124, 1225-1242, 1996.
- Lazarev, A., D. Schertzer, S. Lovejoy, and Y. Chigirinskaya, Unified multifractal atmospheric dynamics tested in the tropics: part II, vertical scaling and Generalized Scale Invariance, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 1, 115-123, 1994.
- Leith, C.E., Atmospheric predictability and two-dimensional turbulence, *J. Atmos. Sci.*, 28, 145-161, 1971.
- Leith, C.E., and R.H. Kraichnan, Predictability of turbulent flows, *J. Atmos. Sci.*, 29, 1041-1058, 1972.
- Lilley, M., S. Lovejoy, N. Desaulnier-Soucy, and D. Schertzer, Multifractal large N limit in Rain, *J. Hydrology* ((in press)), 2004a.
- Lilley, M., K. Strawbridge, S. Lovejoy, and D. Schertzer, 23/9 dimensional anisotropic scaling of passive admixtures using lidar data of aerosols, *Phys Rev. E*, (in press), 2004b.
- Lilly, D., and E.L. Paterson, Aircraft measurements of atmospheric kinetic energy spectra, *Tellus*, 35A, 379-382, 1983.
- Lilly, D.K., Theoretical predictability of small-scale motions, in *Turbulence and predictability in geophysical fluid dynamics and climate dynamics*, edited by M. Ghil, R. Benzi, and G. Parisi, pp. 281-280, North Holland, Amsterdam, 1985.
- Lindborg, E., Can the atmospheric kinetic energy spectrum be explained by two-dimensional turbulence?, *J. Fluid Mech.*, 388 (259-288), 1999.
- Lorenz, E.N., The predictability of hydrodynamic flow, *Trans. New York Acad. Sci., Ser. 2* (25), 409-432, 1963.
- Lorenz, E.N., The predictability of a flow which possesses many scales of motion, *Tellus*, 21, 289-307, 1969.
- Lovejoy, S., M. Lilley, N. Desaulnier-Soucy, and D. Schertzer, Large particle number limit in rain, *Phys. Rev. E*, 68 (22), 025301/1-025301/4, 2003.
- Lovejoy, S., and D. Schertzer, Multifractals and Rain, in *New Uncertainty Concepts in Hydrology and Water Resources*, edited by Z.W. Kunzewicz, pp. 62-103, Cambridge University Press, 1995.
- Lovejoy, S., D. Schertzer, and J.D. Stanway, Direct Evidence of Multifractal Atmospheric Cascades from Planetary Scales down to 1 km., *Phys. Rev. Letter*, 86 (22), 5200-5203, 2001a.
- Lovejoy, S., D. Schertzer, and A.F. Tuck, Fractal Aircraft Trajectories and anomalous turbulent statistics, *PRES*, (in press), 2004.
- Lovejoy, S., Y. Tessier, M. Claereboudt, W.J.C. Currie, J. Roff, E. Bourget, and D. Schertzer, Universal Multifractals and Ocean patchiness Phytoplankton, physical fields and coastal heterogeneity, *J. Plankton Res.*, 23, 117-141, 2001b.
- Mandelbrot, B., *Multifractals and 1/f noise, wild self-affinity in physics.*, Springer, New-York, Berlin, Heidelberg, 1999.
- Marguerit, C., D. Schertzer, F. Schmitt, and S. Lovejoy, Copepod diffusion within multifractal phytoplankton fields, *Journal of Marine Systems*, 16, 69-83, 1997.
- Marsan, D., D. Schertzer, and S. Lovejoy, Causal Space-Time Multifractal modelling of rain, *J. Geophys. Res.*, D 31 (26), 26,333-26346, 1996.
- Meneveau, C., and K.R. Sreenivasan, Simple multifractal cascade model for fully developed turbulence, *Physical Review Letter*, 59 (13), 1424-1427, 1987.
- Métais, O., and M. Lesieur, Statistical predictability of decaying turbulence, *J. Atmos. Sci.*, 43, 857-870, 1986.

- Molteni, R.R., R. Buizza, and T.N. Palmer, The ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 122, 73-119, 1996.
- Monin, A.S., *Weather forecasting as a problem in physics*, MIT press, Boston Ma, 1972.
- Oberhaus, L., B. Vinçon-Leite, C. Quiblier-Lloberas, and A. Groleau, Influence of physical factors on cyanobacteria development in a deep sub-alpine lake (Lake Bourget), *Journal de Recherche Océanographique*, 28, 2003.
- Palmer, T.M., Predicting uncertainty in forecasts of weather and climate, *Reports on Progress in Physics*, 63, 71-116, 2000.
- Parisi, G., and U. Frisch, On the singularity structure of fully developed turbulence, in *Turbulence and predictability in geophysical fluid dynamics and climate dynamics*, edited by M. Ghil, R. Benzi, and G. Parisi, pp. 84-88, North Holland, Amsterdam, 1985.
- Pedlosky, J., *Geophysical fluid Dynamics*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York, 1979.
- Schertzer, D., and S. Lovejoy, On the Dimension of Atmospheric motions, in *Turbulence and Chaotic phenomena in Fluids*, edited by T. Tatsumi, pp. 505-512, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, 1984.
- Schertzer, D., and S. Lovejoy, The dimension and intermittency of atmospheric dynamics, in *Turbulent Shear Flow 4*, edited by B. Launder, pp. 7-33, Springer-Verlag, 1985a.
- Schertzer, D., and S. Lovejoy, Generalised scale invariance in turbulent phenomena, *Physico-Chemical Hydrodynamics Journal*, 6, 623-635, 1985b.
- Schertzer, D., and S. Lovejoy, Physical modeling and Analysis of Rain and Clouds by Anisotropic Scaling of Multiplicative Processes, *Journal of Geophysical Research*, D 8 (8), 9693-9714, 1987.
- Schertzer, D., and S. Lovejoy, Hard and Soft Multifractal processes, *Physica A*, 185, 187-194, 1992.
- Schertzer, D., and S. Lovejoy, Universal Multifractals do Exist!, *J. Appl. Meteor.*, 36, 1296-1303, 1997.
- Schertzer, D., and S. Lovejoy, Space-time Complexity and Multifractal Predictability, *Physica A*, 338 (1-2), 173-186, 2004a.
- Schertzer, D., and S. Lovejoy, Uncertainty and Predictability in Geophysics: Chaos and Multifractal Insights, in *State of the Planet*, edited by S. Sparks, pp. 317-334, AGU, Washington, 2004b.
- Schertzer, D., S. Lovejoy, and F. Schmitt, Structures in turbulence and multifractal universality, in *Small-scale structures in 3D and MHD turbulence*, edited by M. Meneguzzi, A. Pouquet, and P.L. Sulem, pp. 137-144., Springer-Verlag, 1995.
- Schertzer, D., S. Lovejoy, F. Schmitt, I. Tchiguirinskaia, and D. Marsan, Multifractal cascade dynamics and turbulent intermittency, *Fractals*, 5 (3), 427-471, 1997.
- Schmitt, F., S. Lovejoy, D. Schertzer, D. Lavallée, and C. Hooge, First estimates of multifractal indices for velocity and temperature fields, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, serie II*, 314, 749-754, 1992.
- Schmitt, F., D. Schertzer, S. Lovejoy, and G. Brunet, Universal multifractal structure of atmospheric temperature and velocity fields., *Europhysics Lett.*, 34 (3), 195-200, 1996.
- Seed, A., A dynamic and spatial scaling approach to advection forecasting, *J. Applied Met.*, 2002.
- Seuront, L., F. Schmitt, Y. Lagadeuc, D. Schertzer, and S. Lovejoy, Universal Multifractal analysis as a tool to characterize multiscale intermittent patterns: example of phytoplankton distribution in turbulent coastal waters, *J. Plankton Res.*, 21 (5), 877-922, 1999.
- Seuront, L., F. Schmitt, Y. Lagadeuc, D. Schertzer, S. Lovejoy, and S. Frontier, Universal Multifractal structure of phytoplankton biomass and temperature in the ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 3591-3594, 1996.

- She, Z.S., and E. Leveque, Universal scaling laws in fully developed turbulence, *Phys. Rev. Lett.*, 72, 336-339, 1994.
- She, Z.S., and E. Waymire, Quantized energy cascade and log-Poisson statistics in fully developed turbulence, *Phys. Rev. Lett.*, 74, 262-265, 1995.
- Sivapalan, M., Prediction in ungauged basins: a grand challenge for theoretical hydrology, *Hydrol. Process.*, 17, 2003.
- Toth, Z., and E. Kalnay, Ensemble Forecasting at NMC: the generation of perturbations, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 74, 2317-2330, 1993.
- Tuck, A.F., S.J. Hovde, E.C. Richard, D.W. Fahey, and R.S. Gao, A Scaling Analysis of ER-2 Data in the Inner Arctic Vortex During January – March 2000, *J. Geophys. Res.*, (in press), 2003.
- Van Atta, C.W., Geophysical turbulence data and turbulence theory, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 3, 231-235, 1996.
- Van der Hoven, I., Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from .0007 to 900 cycles per hour, *Journal of Meteorology*, 14, 160-164, 1957.
- Vinçon-Leite, B., B. Tassin, and J.-C. Druart, Phytoplankton variability in Lake Bourget: Phytoplankton dynamics and meteorology,, *Lakes and Reservoirs Research and Management*, 7, 93-102, 2002.
-

Présentation de l'Equipe Géodynamo du LGIT.

Denys SCHMITT

Daniel BRITO, Céline EYMIN, Alexandre FOURNIER

Thierry ALBOUSSIERE, Philippe CARDIN, Dominique JAULT, Jean-Paul MASSON, Henri-Claude NATAF, Denys SCHMITT

Bérangère DELEPLACE, Gédéon LEGAUT, Nathanael SCHAEFFER

Thématiques de l'Equipe

Dynamique du noyau terrestre (couplages graine/noyau/manteau, géodynamo)

Dynamique de fluides en rotation

Deux approches :

Expérimentale (eau, gallium, sodium)

Simulations numériques

Parmi nos centres d'intérêt...

Investigation de la turbulence

dans un fluide en rotation rapide
en présence d'un champ magnétique

Magnétoconvection expérimentale avec du gallium
Couette sphérique avec du sodium (expérience DTS)
Code numérique quasi-géostrophique

Différents régimes peuvent être identifiés selon l'ordre de grandeur de U , B , Ω :

$R_m = \frac{UR}{\eta}$ nombre de Reynolds magnétique (advection vs diffusion magnétique)

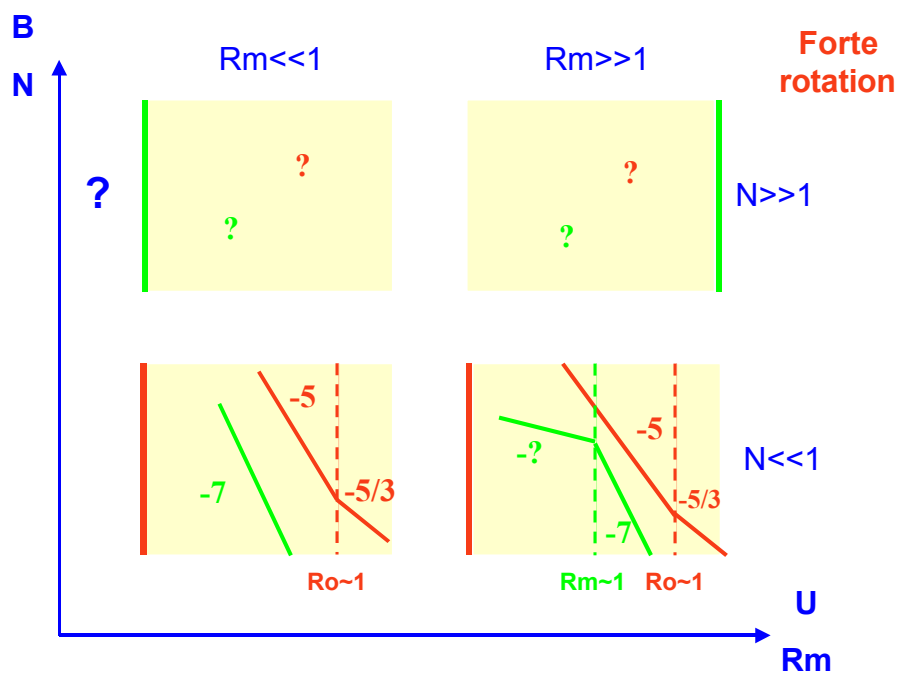
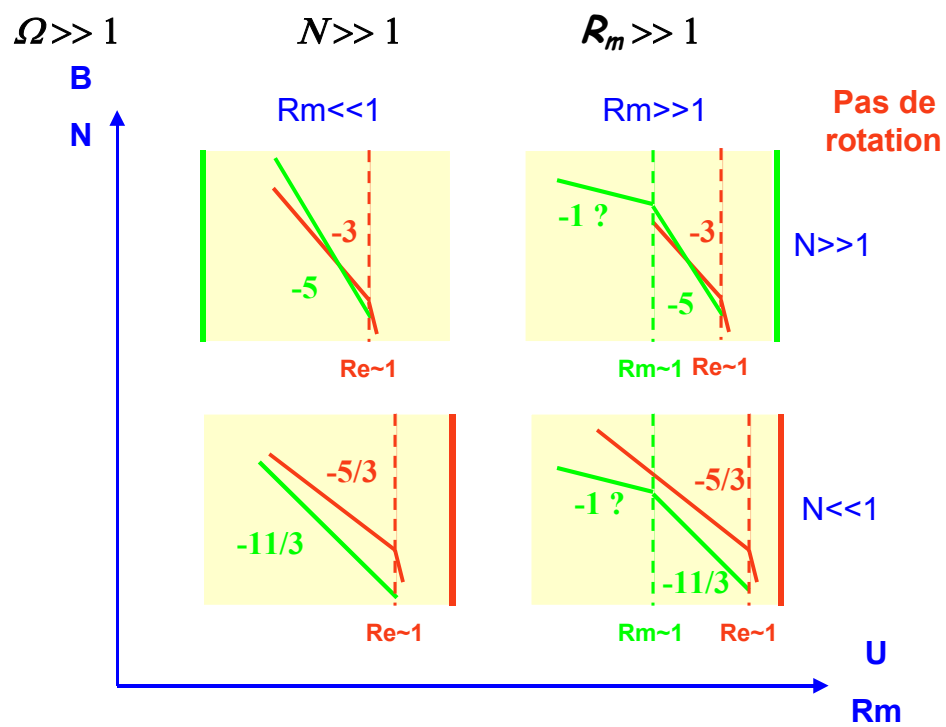
$Re = \frac{UR}{\nu}$ nombre de Reynolds (advection vs diffusion)

$N = \frac{\sigma B^2 R}{\rho U}$ paramètre d'interaction (forces de Lorentz vs forces d'inertie)

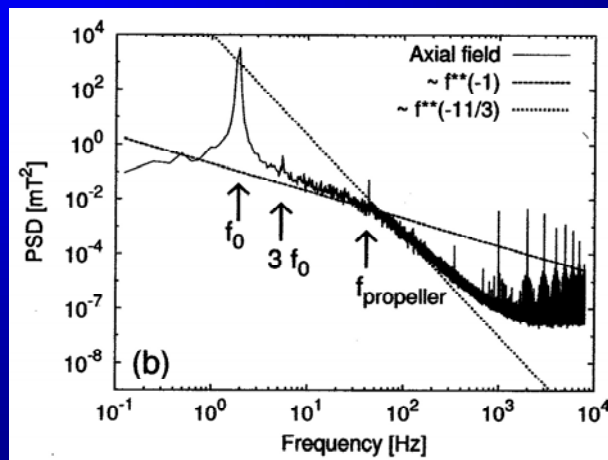
$Ro = \frac{U}{\Omega R}$ Rossby (forces d'inertie vs forces de Coriolis)

Notre objectif :

Caractériser des régimes encore peu étudiés :

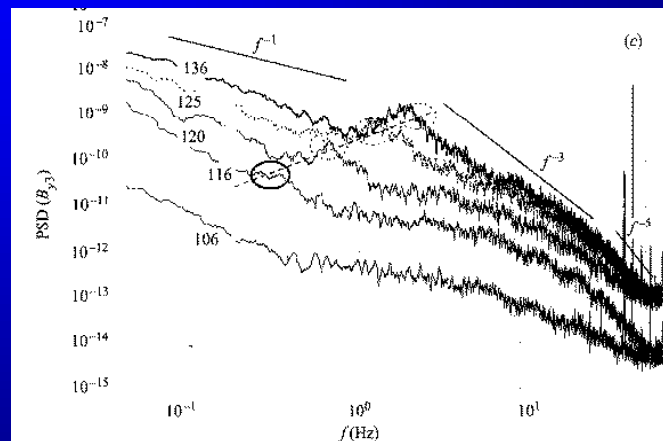


Riga B spectrum



Stefani, 2004

Karlsruhe B spectrum



Müller, Stieglitz & Horanyi, 2004

Rodion Stepanov (*Institute of Continuous Media Mechanics, Perm, Russia*)
 Franck Plunian (*LEGI, Grenoble*)

Principe du modèle :

Le principe du modèle en couche est fondé sur l'expression des équations de Navier-Stokes et de l'induction dans l'espace de Fourier. Dans le cas d'une turbulence isotrope, on admet qu'on peut remplacer toute quantité vectorielle par une quantité scalaire, chaque mode vectoriel étant donc remplacé par une couche scalaire. En supposant uniquement des interactions locales avec les quatre couches voisines (2 de chaque côté), on se ramène au système d'équations aux dérivées en temps ordinaires suivant :

$$(d_t + \text{Re}^{-1} k_n^2) U_n = i k_n \{ (U_{n+1}^* U_{n+2}^* - B_{n+1}^* B_{n+2}^*) - \frac{1}{4} (U_{n-1}^* U_{n+1}^* - B_{n-1}^* B_{n+1}^*) + \frac{1}{8} (U_{n-2}^* U_{n-1}^* - B_{n-2}^* B_{n-1}^*) \} + f_n \quad (1)$$

$$(d_t + \text{Rm}^{-1} k_n^2) B_n = \frac{i k_n}{6} \{ (U_{n+1}^* B_{n+2}^* - B_{n+1}^* U_{n+2}^*) - (U_{n-1}^* B_{n+1}^* - B_{n-1}^* U_{n+1}^*) + (U_{n-2}^* B_{n-1}^* - B_{n-2}^* U_{n-1}^*) \} \quad (2)$$

Dans la couche n correspondant au nombre d'onde $k_n = k_0 2^n$, la vitesse et le champ magnétique sont donnés par les quantités complexes U_n et B_n et le forçage de vitesse par f_n . Les coefficients $1/4$, $1/6$, $1/8$, etc, résultent de la conservation des quantités telles que l'énergie totale, l'hélicité croisée et l'hélicité magnétique dans le cas de viscosité et diffusivité magnétique nulles. Ce cas correspond à la limite infinie des nombres de Reynolds cinétique Re et magnétique Rm . Le forçage est réalisé sur 3 couches voisines, de manière à conserver une injection constante d'énergie par unité de temps, et n'injecter ni hélicité cinétique ni hélicité croisée.

Principaux résultats :

1. En l'absence de champ magnétique on obtient un spectre d'énergie cinétique en $k^{-5/3}$, avec un flux spectral d'énergie plat entre l'échelle de forçage et l'échelle de dissipation visqueuse.
2. En présence de génération de champ magnétique par effet dynamo, et à $\text{Pm} < 1$, le spectre d'énergie cinétique est en k^{-2} aux échelles juste au-dessus de l'échelle de dissipation magnétique (voir figure 1). Cette pente correspond à un transfert d'énergie cinétique en énergie magnétique jusqu'à l'échelle de dissipation ohmique.

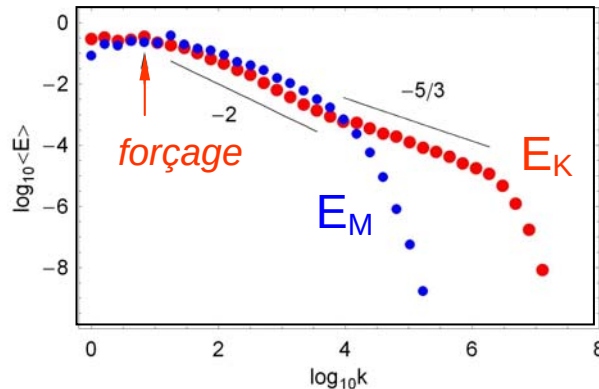


Figure 1. Spectres magnétique et cinétique pour $\text{Pm}=10^{-3}$ et $\text{Re}=10^9$

3. Le rapport des échelles de dissipation ohmique sur visqueuse est en $Pm^{-3/4}$ à faible Pm et en $Pm^{-1/3}$ si $Pm > 1$ (voir figure 2). La pente en $-3/4$ est prévisible selon la théorie de Kolmogorov car dans ce cas $k_v = O(Re^{3/4})$ et $k_\eta = O(Rm^{3/4})$. En revanche la pente en $-1/3$ est surprenante. En effet, selon la vision cinématique de la dynamo, les petites structures d'écoulement de taille l génèrent du champ magnétique d'échelle $lO(Rm^{-1/2})$, conduisant à une pente en $-1/2$ et non en $-1/3$. En fait la pente $-1/3$ résulte d'un calcul dynamique. En supprimant les termes correspondant aux forces de Laplace dans (1), on retrouve bien une pente en $-1/2$.

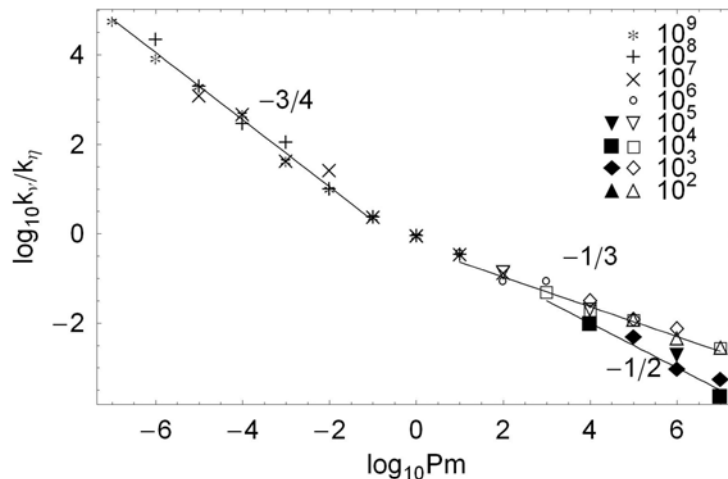


Figure 2. Rapport des échelles de dissipation (ohmique sur visqueuse) en fonction de Pm .

4. Lorsqu'on trace le nombre de Reynolds magnétique critique correspondant au seuil de l'instabilité dynamo en fonction du nombre de Reynolds (figure 3), on trouve qu'après une augmentation du seuil à Reynolds modéré, le seuil tend vers une valeur asymptotique dans la limite de grand Re (ou faible Pm). Par conséquent un effet dynamo à faible Pm est possible !

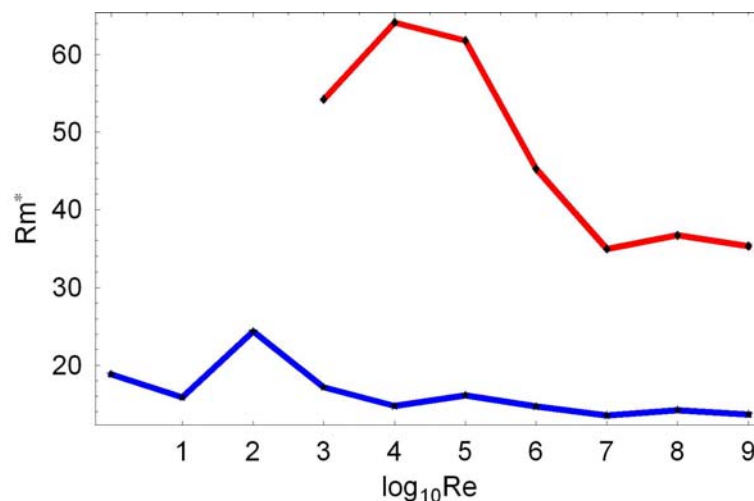


Figure 3. Nombre de Reynolds magnétique critique en fonction du nombre de Reynolds pour 2 échelles de forçage différente : $n=8$ en haut et $n=0$ en bas.

Quelques références sur les modèles en couche:

- Gledzer E.B., *Dokl. Akad. Nauk. SSSR* **209**, 1046 (1973)
 Gloaguen C., Léorat J., Pouquet A., Grappin R., *Physica D* **17**, 154 (1985)
 Yamada M. & Ohkitani K., *J. Phys. Soc. Jpn.* **56**, 4210 (1987)
 Frick P. & Sokoloff D., *Phys. Rev. E* **57**, 4155 (1998)

Turbulence Navier-Stokes en rotation rapide

Les écoulements turbulents en rotation intéressent des domaines très variés comme l'industrie (turbomachines), la météorologie ou la géophysique (océans, atmosphère). Dans ce dernier cas, l'effet de la rotation terrestre se fait particulièrement sentir dans les mouvements atmosphériques à grande échelle. Une description précise des écoulements géophysiques nécessite la prise en compte de nombreux paramètres (rotation, géométrie, stratification...). La méthodologie souvent suivie consiste à isoler un paramètre pour étudier en détail ses effets. De nombreux travaux ont ainsi été dédiés à l'effet de la rotation sur les écoulements turbulents géophysiques dont les équations de Navier-Stokes sont la plus simple représentation. Ces équations s'écrivent par exemple :

$$\partial_t \mathbf{w} - 2(\boldsymbol{\Omega} \cdot \nabla) \mathbf{u} = (\mathbf{w} \cdot \nabla) \mathbf{u} - (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{w} + \nu \nabla^2 \mathbf{w},$$

où $\mathbf{w}$ est la vorticité ($\mathbf{w} = \nabla \times \mathbf{u}$), $\boldsymbol{\Omega}$ le taux de rotation associé à la force de Coriolis et ν la viscosité. L'intensité de la force de Coriolis peut se mesurer par le rapport entre le terme d'advection et le terme de Coriolis. Cette quantité adimensionnelle, $R_o = U/L\Omega$, est le nombre de Rossby. Un faible nombre de Rossby nous indique donc que les effets de la rotation sont dominants. Pour fixer les idées, prenons l'exemple d'un vent s'écoulant   $U \approx 0.1 \text{ms}^{-1}$, de largeur $L \approx 10 \text{km}$; avec $\Omega \approx 10^{-4} \text{s}^{-1}$, nous obtenons $R_o \approx 0.1$ qui est une valeur typique des écoulements géophysiques à grande échelle. Pour cet écoulement, où la viscosité $\nu \approx 0.1 \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$, nous obtenons un nombre de Reynolds $Re = UL/\nu \approx 10^8$.

Plusieurs expériences en laboratoire ont été dédiées à l'étude des écoulements turbulents en rotation (Hopfinger et al., 1982; Jacquin et al. 1990; Baroud et al. 2002, Morize et al. 2004). D'un point de vue expérimental, il n'est pas très difficile d'obtenir un petit nombre de Rossby ($R_o < 0.1$) dans une cuve en rotation rapide. Il est en revanche difficile d'obtenir un nombre de Reynolds supérieur à 10^5 . Ce nombre est toutefois suffisamment élevé pour que l'écoulement soit en régime de turbulence pleinement développée. Ces expériences ont pu mettre en évidence que la rotation a pour effet de bidimensionnaliser une turbulence initialement isotrope. Cela se traduit, par exemple, par une forte corrélation de la vitesse dans la direction du taux de rotation et par un ralentissement de la décroissance de l'énergie. L'expérience récente de Baroud et al. (2002), où un forçage est appliqué à petite échelle, semble montrer, entre autres, une cascade inverse de l'énergie avec un spectre en k^{-2} au lieu de la loi de Kolmogorov en $k^{-5/3}$ pour un écoulement turbulent sans rotation. Plus récemment, Morize et al. (2004) ont montré un raidissement du spectre perpendiculaire de l'énergie lorsque que le taux de rotation augmente. Initialement en $k^{-5/3}$, un spectre aussi pentu que $k^{-2.3}$ a pu être obtenu pour les nombres de Rossby les plus faibles. Ces expériences montrent donc une bidimensionalisation de la turbulence en présence de rotation dont les propriétés se distinguent toutefois de celles d'une turbulence purement bidimensionnelle (Kraichnan, 1967).

La turbulence en rotation a été largement étudiée par le biais des simulations numériques (Bardina et al., 1985; Hossain et al., 1994; Cambon et al, 1997, Smith et Waleffe,

1999). La réduction du transfert nonlinéaire dans la direction du taux de rotation Ω a été confirmée et un raidissement de la loi de puissance suivie par le spectre d'énergie a été mesuré. En particulier, Smith et Waleffe (1999) ont montré, par des simulations numériques directes, que lorsque l'écoulement est forcé tridimensionnellement à un nombre d'onde intermédiaire k_f , on observe une cascade directe de l'énergie pour $k > k_f$, avec un spectre isotrope 1D en k^{-2} , et une cascade apparemment inverse pour $k < k_f$, avec un spectre isotrope 1D en k^{-3} . Leur analyse démontre que l'énergie à grande échelle est principalement contenue dans l'état 2D (*i.e.* pour $k_{\parallel} = 0$, avec $\mathbf{k} \cdot \Omega = k_{\parallel} \Omega$), alors qu'à petite échelle elle est principalement contenue dans les modes 3D ($k_{\parallel} > 0$). Le spectre 2D observé pourrait, d'après les auteurs, être le résultat d'interactions non locales entre les modes 2D et 3D, plutôt que la conséquence d'une cascade inverse 2D. Le comportement à petite et grande échelle est fortement influencé par le rapport d'aspect entre la résolution verticale, le long de Ω , et horizontale : un petit rapport d'aspect, *i.e.* une faible résolution dans la direction verticale, mène à une réduction du nombre de triades résonnantes et une altération importante du spectre d'énergie. Leurs simulations révèlent un spectre d'énergie globalement en $k^{-5/3}$ pour un rapport d'aspect suffisamment petit. Ce résultat suggère donc que les triades résonnantes ont un rôle important à jouer dans la turbulence en rotation. En parallèle, Zeman (1994) et Zhou (1995) ont développé une phénoménologie pour la turbulence forte en rotation qui mène à un spectre d'énergie 1D isotrope en k^{-2} . Cependant, dans une telle approche le sens de la cascade ne peut pas être prédit. Dans le domaine de la théorie spectrale, les avancées les plus importantes ont été obtenues au moyen de méthodes de fermeture de type E.D.Q.N.M.. Cambon et al. (1989, 1997) ont développé un formalisme basé sur une décomposition en modes propres. La fermeture *ad hoc* utilisée mène à des équations dynamiques pour, par exemple, le spectre de l'énergie. La simulation de ces équations a permis de comprendre plus précisément certaines propriétés observées comme la bidimensionalisation du spectre de l'énergie.

Mes travaux théoriques sur la turbulence d'ondes inertielles consistent à quantifier exactement les effets de la rotation sur la turbulence Navier-Stokes incompressible, et ce dans la limite asymptotique de faible nombre de Rossby (Galtier, 2003). Ces travaux ont été fortement inspirés de ceux sur la turbulence d'ondes whistlers en électron MHD (Galtier et Bhattacharjee, 2003). En effet, ces deux milieux ont en commun de nombreuses propriétés dont l'origine provient, en partie, de l'existence d'un axe privilégié joué par le taux de rotation Ω , ou par un champ magnétique uniforme. J'ai développé un formalisme eulérien de turbulence d'ondes basé sur une décomposition hélicitaire complexe (Craya, 1958; Cambon et al., 1989; Lesieur, 1990; Waleffe, 1992; Turner, 2000). En effet, les ondes inertielles, solutions des équations de Navier-Stokes en présence de la force de Coriolis, sont des ondes transverses, dispersives, polarisées circulairement. Elles sont caractérisées par une fréquence $\omega(\mathbf{k}) = 2\Omega k_{\parallel}/k$, où $\mathbf{k} \cdot \Omega = k_{\parallel} \Omega$. (Pour les ondes whistlers, nous avons une fréquence proportionnelle à $k_{\parallel} k$.) Ce formalisme eulérien hélicitaire permet d'obtenir, au plus bas ordre, les équations cinétiques d'ondes inertielles dans le cas tridimensionnel pour le spectre de l'énergie $E(\mathbf{k})$ et de l'hélicité cinétique $H(\mathbf{k})$. L'analyse de ces équations permet de montrer que la turbulence d'ondes inertielles partage les mêmes propriétés que la turbulence d'ondes whistlers en électron MHD et que dans les deux limites d'interactions fortement locales et fortement nonlocales, le transfert nonlinéaire se fait préférentiellement dans la direction perpendiculaire à l'axe de rota-

tion. Cette constatation m’a amené à étudier les équations cinétiques dans la limite d’une turbulence fortement anisotrope, *i.e.* où $k_{\perp} \gg k_{\parallel}$ pour laquelle il est possible d’extraire les solutions exactes en loi de puissance. Les solutions anisotropes axisymétriques à flux constant de Kuznetsov-Zakharov-Kolmogorov (Kuznetsov, 1972, Zakharov et al., 1992) sont de la forme (Galtier, 2003) :

$$E(k_{\perp}, k_{\parallel}) \sim k_{\perp}^{-5/2} k_{\parallel}^{-1/2}, \quad H(k_{\perp}, k_{\parallel}) \sim k_{\perp}^{-3/2} k_{\parallel}^{-1/2}.$$

Une description heuristique anisotrope permet de retrouver ces doubles lois de puissance. On peut remarquer que nous retrouvons le résultat phénoménologique isotrope de Zeman (1994) et Zhou (1995) lorsque les directions horizontale et verticale ne sont plus différenciées. Notons aussi, que ces prédictions anisotropes constituent **une première**, ce qui peut être surprenant puisque le comportement anisotrope des fluides en rotation est par ailleurs largement reconnu par la communauté. L’étude des conditions de validité des solutions KZK montre *a priori* une divergence infra-rouge du spectre, mais la coupure introduite par l’hypothèse anisotrope ($k_{\perp} \gg k_{\parallel}$) nous sauve de ce problème. Enfin, on peut aussi démontrer que dans ce régime l’énergie cascade vers les petites échelles.

La turbulence d’ondes étant une théorie asymptotique, il existe un domaine de validité des équations cinétiques d’ondes inertielles. La séparation d’échelle supposée entre le temps caractéristique des nonlinéarités et la période des ondes inertielles se traduit par l’existence d’un cône “interdit”, à faibles $k_{\parallel}$, dans lequel les équations cinétiques ne sont pas valides. Cette propriété se retrouve aussi pour la turbulence d’ondes whistlers. Par ailleurs, on peut montrer que l’état bidimensionnel ($k_{\parallel} = 0$) se découple des modes 3D ($k_{\parallel} > 0$). En d’autres termes, la turbulence bidimensionnelle (le mode lent) n’est pas décrite par le régime de turbulence d’ondes. Ce type de découplage n’est pas nouveau puisqu’on le retrouve aussi en turbulence stratifiée. Il semble donc particulièrement intéressant de sonder en profondeur ce cône et de voir si, éventuellement, des processus à un ordre $n > 3$ peuvent interagir avec l’état 2D comme le suggèrent les simulations numériques directes de Smith et Waleffe (1999). Remarquons qu’une étude similaire sur les fluides en rotation rapide a été faite récemment (Rubinstein et al. 2004; Godeferd et al., 2005). En particulier, ce travail a consisté à simuler numériquement les équations cinétiques d’ondes.

Comme je l’ai signalé à plusieurs reprises, la turbulence Navier-Stokes en rotation rapide est très proche de celle de l’électron MHD ou EMHD lorsqu’un fort champ magnétique extérieur est présent. L’EMHD correspond à une description à haute fréquence des plasmas. Lorsque la fréquence des phénomènes étudiés est proche de la gyrofréquence des ions, on ne peut plus négliger l’inertie des ions. On doit alors se tourner vers la loi d’Ohm généralisée. Dans une limite d’échelle spatio-temporelle suffisamment petite (pour des fréquences comprises entre les gyrofréquences des ions et des électrons), les électrons et les ions se découplent totalement. Sur des échelles de temps aussi courtes, les ions deviennent très lourds et vont constituer un fond homogène statique. Le courant électrique, et plus largement la dynamique, seront alors totalement décrits par le mouvement des électrons. Dans cette limite, nous obtenons l’approximation de la EMHD. Les ondes, solutions linéaires des équations EMHD en présence d’un champ magnétique uniforme sont les ondes whistlers. Ces ondes transverses, dispersives, polarisées circulairement à droite, sont observées dans de nombreux milieux comme par exemple le vent solaire.

Notes pour le GDR Structure de la Turbulence et Mélange

Suggestions de thèmes ou sous-thèmes

F. Schmitt, CNRS et U. Lille 1

Francois.schmitt@univ-lille1.fr

1. Simulations stochastiques de l'intermittence de la turbulence

Il est reconnu que l'intermittence de la turbulence développée est bien modélisée par des cascades multiplicatives. Lorsque cette cascade est continue en échelle, les modèles admissibles sont de type « log-Infiniment Divisibles ». Depuis 4-5 ans, plusieurs auteurs ou équipes ont pu avancer vers la simulation stochastique de tels processus, et il existe un certain nombre de publications sur le sujet (voir ci-dessous).

Il est remarquable que la communauté française soit très présente sur ce thème (F. Schmitt, P. Abry, P. Chainais, J. F. Muzy, E. Bacry, J. Barral...). Une réunion sur ce thème a été organisée en mars 2004 par le GDR ISIS (Information, Signal, Image, Vision) : voir <http://www.isima.fr/~chainais/PUB/CR110304.html>. Cette réunion était orientée maths appliquées et traitement du signal. Une réunion analogue orientée « turbulence » serait intéressante.

1. F. G. Schmitt :

F. G. Schmitt and D. Marsan, 2001. Stochastic equations generating continuous multiplicative cascades, *Eur. Phys. J. B* 20, 3-6.

F. G. Schmitt, 2003. A causal multifractal stochastic equation and its statistical properties, *Eur. Phys. J. B* 34, 85-98.

2. B. B. Mandelbrot :

J. Barral and B. B. Mandelbrot, 2001. Multifractal products of cylindrical pulses. *Cowles Foundation Discussion paper* 1287.

J. Barral and B. B. Mandelbrot, 2002. Multifractal products of cylindrical pulses. *Probab. Theory Relat. Fields* 124, 409-430.

3. E. Bacry et J. F. Muzy

J. F. Muzy and E. Bacry, 2002. Multifractal stationary random measures and multifractal random walks with log infinitely divisible scaling laws, *Physical Review E* 66, 056121.

E. Bacry and J. F. Muzy, 2003. Log-infinitely divisible multifractal processes, *Comm. Math. Phys.* 236, 449-475.

4. P. Chainais, R. Riedi et P. Abry :

P. Chainais, R. Riedi and P. Abry, 2003a. Scale invariant infinitely divisible cascades. *Proceedings of the PSIP 2003* (Physics in Signal and Image Processing).

P. Chainais, R. Riedi and P. Abry, 2003b. On non scale invariant infinitely divisible cascades. *Proceedings of GERTSI 2003 conference*.

P. Chainais, R. Riedi and P. Abry, 2005a. Warped infinitely divisible cascades : beyond power laws. *Traitement du Signal* (in press).

P. Chainais, R. Riedi and P. Abry, 2005b. On non scale invariant infinitely divisible cascades. *IEEE Transactions on Information Theory* (in press).

5. R. Schmiegél et al.

J. Schmiegél, J. Cleve, H. C. Eggers, B. R. Pearson and M. Greiner, 2004. Stochastic energy cascade model for (1+1)-dimensional fully developed turbulence, *Physics Letters A* 320, 247-253.

O. E. Barndorff-Nielsen and J. Schmiegél, 2004. Lévy-based spatial-temporal modelling, with applications to turbulence, *Russian Math. Surveys* 59, 65-90.

6. D. Ostrovsky

D. Ostrovsky, 2004. Limit lognormal multifractal as an exponential functional, *Journal of Statistical Physics* 116, 1491-1520.

2. Modèles invariants d'échelle pour l'intermittence de la turbulence : vers le vectoriel ?

Il est notable qu'il existe 2 types de communautés en turbulence : la turbulence de l'ingénieur (modèles de viscosité, LES, DNS, etc.) et la turbulence plus « physique », incluant ceux qui étudient et modélisent l'intermittence. Les résultats obtenus dans ce dernier sous-domaine vont rarement jusqu'à l'application industrielle et les ingénieurs ignorent largement les résultats et acquis existant pour l'intermittence. Pourtant, dans ce domaine, on est capable de reproduire des comportements moyens et extrêmes, avec des moments allant aisément jusqu'à l'ordre 5 ou 6. Par contre, les modèles de viscosité et autres modèles utilisés en turbulence de l'ingénieur et dans les applications industrielles et environnementales, reposent sur des hypothèses dont il est bien connu qu'elles sont fausses (séparation d'échelle, etc.) et utilisent une multitude de paramètres arbitraires. Les modèles correspondants sont adéquats seulement pour l'ordre 1 (les moments d'ordre 2 sont rarement proches des données).

Cela montre qu'il serait tout à fait utile de pouvoir « exporter » les méthodes et approches de l'intermittence vers des domaines plus appliqués. Cela pourrait fournir matière à un sous thème, incluant des recherches dans les directions suivantes :

- le vectoriel. Les modèles de l'intermittence sont encore 1D, alors que les applications demandent de maîtriser le vectoriel.
- Inclure des effets de bord. Les applications sont rarement intéressées par ce qui se passe loin des parois, mais au contraire par l'effet de celles-ci sur les statistiques ; c'est encore balbutiant en ce qui concerne l'intermittence.

3. Turbulence et taux de rencontre des particules, et applications.

L'influence de la turbulence sur le taux de rencontre de particules est manifeste. Par exemple, des particules inertielles ont des concentrations inhomogènes sous l'effet de la turbulence, ce qui va favoriser leur taux de rencontre. Ceci est intéressant pour différents types d'applications : aérosols, formation de gouttes d'eau dans les nuages, et aussi dans le domaine des couplages physique biologie dans l'océan. Dans ce dernier domaine, les particules sont des organismes biologiques et leur taux de rencontre est fondamental pour leur écologie : rencontre avec la nourriture, et rencontre avec un partenaire pour la reproduction ; il existe un certain nombre de travaux sur ce sujet, principalement effectués par des biologistes ; il serait intéressant d'évoquer le domaine pour suggérer plus d'implications de « turbulenciers ».

De plus, il existe un certain nombre de résultats récents dans le domaine des taux de rencontre de particules sous l'effet de la turbulence (voir ci-dessous une sélection de refs récentes), mais assez peu, apparemment, d'équipes ou auteurs français (à l'exception de O. Simonin). Un sous-thème sur le sujet pourrait être l'occasion de lancer le débat et l'intérêt pour le sujet et ses applications ?

W. C. Reade, L. R. Collins, Effect of preferential concentration on turbulent collision rates, *Phys fluids* 12 (2000) 2530.

E. Balkovsky, G. Falkovich, A. Fouxon, Intermittent distribution of inertial particles in turbulent flows, *PRL* 86 (2001) 2790.

D. M. Lewis, T. J. Pedley, The influence of turbulence on plankton predation strategies, *J. theor. Biol.* 210 (2001) 347.

G. Falkovich, A. Fouxonn, M. G. Stepanov, Acceleration of rain initiation by cloud turbulence, *Nature* 419 (2002) 151.

L. I. Zaichik, O. Simonin, V. M. Alipchenkov, Two statistical models for predicting collision rates of inertial particles in homogeneous isotropic turbulence, *Phys Fluids* 15 (2003) 2995.

GDR 2865 : « Structure de la turbulence et Mélange »

5 - 7 Avril 2005

LMFA, Ecole Centrale de Lyon

Réunion conjointe avec le GDR Bruit dans les transports

*Organisateurs locaux: Jean-Pierre Bertoglio, Philippe Blanc-Benon,
Claude Cambon et Fabien Godeferd*

Thèmes abordés :

- Couche limite turbulente

Animatrice: Bérengère Dubrulle

Compte-rendu par Frédéric Plaza

- Turbulence couplée avec effets d'ondes

Animateur: Claude Cambon

Compte-rendu par Thierry Alboussière

- Mélange, dispersion turbulente, advection chaotique

Animatrice: Luminita Danaila

Compte-rendu par Michel Gonzales

- Divers

Animateurs: Laurent Chevillard et Wouter Bos

Compte-rendu par Frédéric Moisy

Thème : expériences et simulation des écoulements turbulents en proche paroi.

Cette session a permis à plusieurs intervenants de présenter des travaux éclectiques sur les écoulements de paroi en présentant des problèmes spécifiques à ce type d'écoulements. Les méthodes standards de simulation (LES), sont discutées dans ce contexte (1 et 3) ; les expériences et simulations exactes (2 et 4) font apparaître une compréhension encore partielle des structures dynamiques présentes en paroi. C'est sans doute un domaine où la compréhension du processus turbulent a encore beaucoup à apporter aux applications.

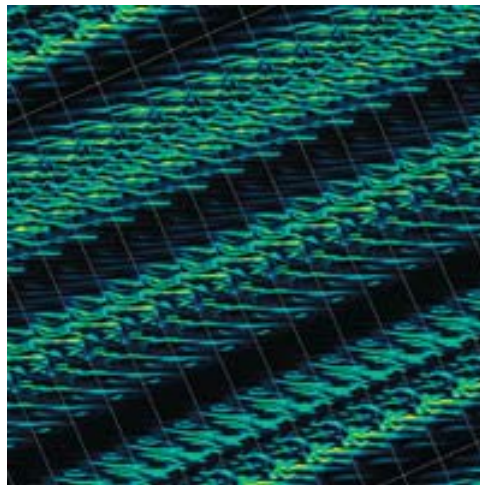
1) Bérengère Dubrulle débute par une présentation du problème de la simulation numérique des écoulements turbulents. On ne peut prendre en compte tous les degrés de liberté présents dans les écoulements astrophysiques, géophysiques, industriels ou même dans un grand nombre d'expériences de laboratoire. Les stratégies classiques consistent à projeter et paramétrer (modéliser) les petites échelles : on trouve à la fois l'approche RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes), qui consiste à séparer la moyenne statistique des fluctuations, dans lesquelles sont comprises les petites échelles; l'approche LES (large Eddy Simulation) garde une partie filtrée passe-bas de l'écoulement fluctuant, les grandes échelles, au détriment des petites échelles, qui sont modélisées. Dans les deux approches, les petites échelles apparaissent à travers un tenseur des contraintes supplémentaires, dit *tenseur de Reynolds* (pour la LES, on trouve plutôt la terminologie *tenseur de sous-maille*). La plupart des modèles de turbulence prennent en compte l'influence des degrés décimés en modélisant directement ces tenseurs (de Reynolds ou sous-maille), par exemple via une viscosité turbulente. Une autre approche consiste à remplacer ces degrés de liberté décimés par un bruit à faible temps de corrélation, voire non-corrélés en temps. La dynamique s'apparente alors à celle d'une équation de Langevin généralisée.

On peut cependant se demander quelle est l'influence perdue de ces degrés décimés. B. Dubrulle cite leur rôle de transport, en prenant exemple de l'équation de la vorticité. Elle signale aussi leur effet sur l'intermittence en échelle de la turbulence. Alors que la prédiction à la Kolmogorov induit une invariance d'échelle de la distribution de probabilité des incréments, celle-ci n'est pas vérifiée expérimentalement. B. Dubrulle explique que cet effet est relié à l'importance relative des interactions dissonantes entre échelle par rapport aux interactions accordées. Cela revient à dire que les interactions entre structures ne peuvent être seulement locales en échelle (c'est-à-dire entre structures de même taille caractéristique), mais font intervenir des interactions entre échelles très distinctes. La suppression des petites échelles pose donc problème si l'on s'intéresse à l'intermittence d'échelle. La paramétrisation du tenseur de sous-maille pose aussi d'autres problèmes : il doit rendre compte à la fois des phénomènes de viscosité turbulente (transfert d'énergie des grandes vers les petites échelles) et de back-scatter (transfert d'énergie dans les grandes échelles). De plus le voisinage des parois et la présence de couche limite imposent de faire varier la largeur du filtre selon la distance à la paroi.

B. Dubrulle propose une approche théorique et numérique (en collaboration avec Laval, Nazarenko, Sullivan, Hersant) où sont prises en compte les interactions dissonantes entre petites et grandes échelles par un processus multiplicatif avec un bruit additif, et les interactions accordées par une viscosité turbulente dans l'équation des grandes échelles. Les petites échelles sont prises en compte dans les équations moyennées et simulées à l'aide d'une équation linéaire stochastique (SES). Elles subissent aussi à la fois les interactions locales (viscosité turbulente) et dissonantes (RDT et bruit stochastique pour rendre compte de

l'influence des grandes échelles). Ce modèle est testé dans divers écoulement : profil dans un canal, dans la couche limite atmosphérique, turbulence 2D, où une grande économie de temps par rapport aux simulations directes de calcul est constatée. Enfin, un modèle LES – Langevin, où la dynamique des petites échelles est modélisée par une équation de Langevin généralisée (équation d'évolution linéaire avec bruit additif delta - corrélé en temps) est présenté. L'importance du forçage stochastique, en particulier dans l'intermittence d'échelle, est mise en évidence

2) Laurette Tuckerman, présente ensuite un travail réalisé avec D. Barkley (Université de Warwick) sur les motifs de bandes turbulentes dans l'écoulement de Couette plan c'est-à-dire une couche de fluide située entre deux plaques parallèles infinies qui se déplacent à des vitesses opposées.



Simulation numérique de l'écoulement de Couette en canal plan (L. Tuckerman, D. Barkley)

Tout comme l'écoulement de Poiseuille cylindrique, il est linéairement stable à tout nombre de Reynolds mais subit dans les expériences une transition à la turbulence vers $Re = 325$. À ces mêmes valeurs de Re , des expériences récentes (2000-2002) par Prigent et Dauchot au CEA-Saclay ont mis en évidence un motif remarquable, stable et permanent, de bandes laminaires et turbulentes. Le motif présente un angle (de 25 à 37 degrés) par rapport à l'écoulement principal et une très grande longueur d'onde (de 20 à 30 fois la distance entre les plaques).

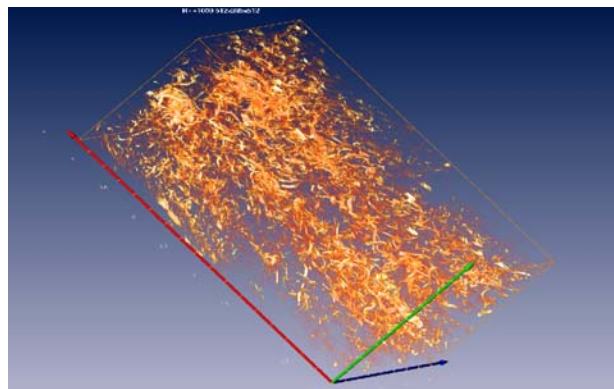
L. Tuckerman a simulé ces motifs numériquement en remplaçant les grandes dimensions latérales de l'expérience par un rectangle périodique incliné par rapport à la direction longitudinale. Une seule direction longitudinale suffit pour obtenir un motif de bandes ; l'autre direction transverse peut être prise de la dimension minimale nécessaire pour observer la turbulence. On peut ainsi déterminer numériquement pour quels angles et longueurs peut apparaître un motif en bandes. Dans un domaine de longueur 120 et d'angle d'inclinaison de 24 degrés, en diminuant Re de 420 à 290, on observe successivement une turbulence uniforme, de l'intermittence spatio-temporelle, trois bandes turbulentes, puis deux, puis une seule, et finalement l'écoulement de Couette laminaire. Cette séquence est en accord quantitatif avec les expériences.

3) Emmanuel Lévêque revient sur la simulation des grandes échelles, en présence de paroi. Il rappelle la difficulté de simuler numériquement les écoulements turbulents, vu que le coût des simulations en terme de temps de calcul augmente comme le cube du Reynolds. La LES se trouve légitimée par le fait que l'essentiel de l'énergie cinétique de l'écoulement et de ses

propriétés de transport sont contenues dans les grandes échelles, les petites échelles expliquant quant à elles la dissipation visqueuse et les phases ultimes du mélange turbulent, où intervient la diffusion. Il rappelle que la simulation des grandes échelles fait intervenir un tenseur de sous - maille, représentant l'action des petites échelles, qui est modélisé en LES. La modélisation la plus répandue est due à Smagorinsky, qui repose sur l'introduction d'une viscosité turbulente qui dépend de l'échelle de filtrage, du tenseur des déformations et d'une constante empirique, fixée à 0,2 pour la turbulence homogène isotrope. L'idée supportant cette modélisation est d'ajuster une viscosité turbulente pour que l'échelle de Kolmogorov calculée avec cette viscosité coïncide avec la longueur de filtrage.

Malgré sa popularité, le modèle de Smagorinsky a quelques inconvénients : il est trop dissipatif, c'est-à-dire qu'il transfère trop d'énergie aux petites échelles. Il a de plus beaucoup de mal à donner une prévision correcte de la turbulence en paroi. Cela incite à modifier les paramètres du modèle à proximité d'une paroi. E. Lévêque présente un travail en cours, en collaboration avec Bertoglio, Shao, Laadhari et Toschi, où l'on modifie la viscosité turbulente pour prendre en compte le cisaillement moyen, en fonction de la distance à la paroi. Ce modèle retrouve le modèle de Smagorinsky standard en l'absence de cisaillement moyen. Il apporte toutefois une amélioration significative pour le calcul du flux moyen d'énergie transférée aux petites échelles. Des tests supplémentaires sont en cours pour valider cette modélisation.

4) Faouzi Laadhari présente des simulations numériques directes de l'écoulement turbulent en canal plan à des nombres de Reynolds basés sur la demi hauteur du canal et la vitesse au centre, compris entre 1600 et 34200. Ces simulations ont permis de mettre en évidence les points suivants : le profil de vitesse moyenne suit une loi logarithmique dans une zone dont l'étendue reste relativement faible mais qui est en bon accord avec les résultats expérimentaux les plus récents ; dans la zone de proche paroi, les effets du nombre de Reynolds sur l'énergie cinétique turbulente s'estompent lorsque celle-ci est normalisée à la fois par la vitesse de frottement et la vitesse au centre du canal (échelle mixte) ; l'évolution du coefficient de corrélation entre les composantes longitudinale et verticale de la vorticité permet de mettre en évidence une nette séparation entre la zone de proche paroi et le reste de l'écoulement. Les visualisations, basées sur l'enstrophie normalisée par sa variance, montrent que les tourbillons se regroupent en amas ou "clusters".



Simulation numérique directe de l'écoulement turbulent en paroi. On visualise les zones d'enstrophie supérieure à un niveau donné, et donc les tourbillons regroupés en amas (F. Laadhari).

5) Enfin, Sabine Decamp présente des résultats expérimentaux de mélange de la plate-forme Coriolis. Un marqueur chimique permet de visualiser la répartition de scalaire sur un relief particulier soumis à une rotation.

GDR Structure de la turbulence et mélange

École Centrale de Lyon, 5-6 avril 2005

Compte-rendu du thème 2 **Turbulence couplée avec effets d'ondes**

Thierry Alboussière

Claude Cambon a été l'animateur de ce thème et a présenté un exposé introductif.

Il se place dans le cadre de la turbulence statistiquement homogène et anisotrope. Son analyse porte sur la décomposition des écoulements en modes propres ondes/vortex et peut s'appliquer aux écoulements en rotation, stratifiés, MHD, etc, qui sont le siège d'ondes inertielles, de gravité, d'Alfvén. Elle a aussi été appliquée à des écoulements moyens non homogènes, tels qu'un gradient de vitesse moyenne.

Les interactions non linéaires entre modes se concentrent sur des ondes dites résonnantes, dont les taux de croissance vérifient $\sigma(k) + \sigma(p) + \sigma(q) = 0$ où les vecteurs d'ondes satisfont à l'égalité $k + p + q = 0$. De ce fait, la turbulence d'onde est un objet d'étude privilégié pour les méthodes de fermeture statistique en deux points tels que EDQNM.

Claude Cambon considère ensuite les propriétés Lagrangiennes de dispersion des particules, liées aux corrélations en deux temps des fluctuations de vitesses (Taylor 1921, Kaneda 2000). En faisant l'hypothèse de l'identification de la corrélation Eulérienne et Lagrangienne, on peut montrer que la capacité d'un écoulement à capturer des particules dépend de la loi de dispersion des ondes : la dispersion turbulente est liée à la dispersion des ondes. La relation de dispersion des ondes conditionne également l'aspect de la turbulence, qui fait qu'en présence de rotation elle s'organise en "cigares" et qu'en présence de stratification, elle s'organise en "galettes".

Les triades résonnantes mentionnées ci-dessus sont capables d'engendrer des cascades angulaires d'énergie dans l'espace spectral, qui font que pour la turbulence en rotation les vecteurs d'ondes parallèles à la direction de rotation sont dépeuplés alors qu'en turbulence stratifiée les vecteurs d'ondes perpendiculaires à la gravité sont dépeuplés. Claude Cambon rappelle brièvement les bases des modèles EDQNM qui reposent essentiellement sur une fermeture des corrélations quadruples des fluctuations de vitesses qui sont exprimées à l'aide des corrélations doubles par la relation exacte des distributions normales. L'EDQNM rend compte de la cascade angulaire de l'énergie et dans une forme anisotrope asymptotique peut conduire à des spectres de la forme $E(k_{\parallel}, k_{\perp}) \sim k_{\parallel}^{-1/2} k_{\perp}^{-7/2}$ (Galtier, 2003), qui moyennés angulairement produisent $E(k) \sim k^{-3}$, sans qu'il s'agisse de turbulence bidimensionnelle ($k_{\parallel} = 0$).

De plus, l'EDQNM rend compte non seulement de la directivité des vecteurs d'ondes mais

également de la polarisation des ondes et produit une dissymétrie cyclones/anticyclones en fluides tournants.

En conclusion, Claude Cambon mentionne la complémentarité de la DNS (maintenant capable d'aborder des régimes asymptotiques) et les méthodes analytiques du types EDQNM (qui nécessitent un fort investissement numérique dans leur mise en œuvre). Enfin, il engage une discussion sous forme de polémique humoristique entre les descriptions statistiques des structures de la turbulence et les arguments de stabilité des dites structures, qu'il estime trop "molles", pas assez rigoureusement définies, pour subir une étude de stabilité.

Olivier Praud présente une expérience de turbulence en fluide stratifié (eau salée) en référentiel tournant effectuée sur la plaque CORIOLIS. La turbulence est engendrée par un peigne de barreaux verticaux, l'objectif étant de créer des mouvements surtout horizontaux et de ne pas introduire d'échelle verticale, afin précisément de mesurer le développement des échelles verticales dans cette turbulence.

À l'aval du peigne, une méthode de PIV permet de visualiser les écoulements dans une zone horizontale 3m x 3m, dont la profondeur est variée successivement (de la surface au fond, à 50 cm). Avec stratification et sans rotation, des mouvements quasi-horizontaux se développent, des appariements de structures se forment et les échelles horizontales grandissent jusqu'à occuper tout le champ de visualisation. Les isovaleurs de la vorticité verticales montrent de belles "galettes", et pas de corrélation verticale. Sa distribution est quasiment Gaussienne.

En décomposant la vitesse selon des modes vortex et ondes de gravité, il est montré que l'énergie cinétique est essentiellement due aux modes vortex et ce de plus en plus à mesure que la turbulence décline. Le déclin de l'énergie cinétique est indépendant du nombre de Reynolds et du nombre de Froude. La dissipation s'effectue par les gradients verticaux des vitesses horizontales et l'on observe une croissance visqueuse de l'échelle verticale (Godoy-Diana et al. JFM 2004).

Avec stratification et rotation, les galettes deviennent des cigares et le taux de décroissance de l'énergie cinétique diminue fortement lorsque le nombre de Rossby diminue. L'évolution des échelles horizontales n'est pas affectée par la rotation.

Enfin, la rotation introduit une dissymétrie cyclones/anticyclones visible sur les pdf de vorticité verticale. On voit apparaître une distribution plus probable de forts cyclones par rapport aux anticyclones mais cette tendance s'estompe pour les plus petits nombres de Rossby.

Cyprien Morize intervient ensuite pour présenter deux expériences de turbulence en rotation, l'une effectuée au FAST dans une cuve tournante équipée d'une grille oscillante, l'autre sur la plaque CORIOLIS. L'énergie cinétique décroît plus rapidement lorsque le pompage d'Ekman se met à agir. C'est la raison pour laquelle des expériences complémentaires ont été conduites à CORIOLIS pour éviter le confinement. Une turbulence de grille 3D est organisée

pour voir comment elle évolue en présence de rotation. Sur CORIOLIS, le temps de déclin est d'environ 3 heures et une caméra 2000 x 2000 pixels permet de visualiser l'écoulement.

On observe que les structures grandissent et que les anticyclones sont détruits préférentiellement pour laisser place à de gros cyclones. Ceci se traduit par une dissymétrie de la pdf de la composante de la vorticité alignée avec l'axe de rotation. Le facteur de skewness croît dans le temps mais le pompage d'Ekman l'empêche de dépasser 3.

Le taux de déclin de l'énergie de cette turbulence 3d devient plus faible à mesure que la rotation imposée est plus forte.

Yannick Cuypers expose ses travaux sur les ondes de gravité internes et la turbulence dans le lac du Bourget (18 km de long). Le profil vertical de température est constitué de l'hypolimnion froid en profondeur, de l'épilimnion en surface, séparés par la zone thermocline. Une ch ene de thermistances   différentes profondeurs permet d'observer le passage des ondes internes.

L'analyse des séries temporelles révèle une période de résonnance proche de 24h, qui est la période propre d'oscillation des ondes internes dans le lac (une discussion a permis de s'assurer que cette période n'était en rien liée à la durée du jour). On voit également l'interaction avec la topographie en considérant des sondes disposées en diverses parties plus ou moins profondes du lac. L'évolution non-linéaire des ondes, le développement de fronts d'onde et de solitons est également mis en évidence. Le développement de fronts internes et de "déferlement" est associé au mélange des diverses couches d'eau du lac, ce qui a de forte conséquence sur son équilibre écologique.

Les ondes et leur développement non-linéaire sont modélisées par une équation de type KdV qui permet par exemple de suivre la propagation de fronts d'ondes.

Les perspectives envisagées sont de caractériser mieux la zone de déferlement et le mélange associé, notamment par la méthode SCAMP, appareil qui permet de mesurer la turbulence à petite échelle (acquisition rapide des fluctuations de température). L'influence de l'accélération de Coriolis sera estimée et éventuellement prise en compte dans la modélisation.

Thierry Alboussière fait une présentation des recherches de l'équipe "géodynamo" du LGIT de Grenoble qui relèvent de la turbulence dans le noyau liquide de la Terre, du fer liquide pour l'essentiel. La rotation de la planète est très forte par rapport aux faibles vitesses dans le noyau (de l'ordre de 10^{-4} m/s) et le nombre de Rossby est de l'ordre de 10^{-6} . Outre la rotation, le champ magnétique maintenu par effet dynamo affecte également la turbulence.

La turbulence pariétale à la limite noyau/manteau est en partie responsable du couplage entre noyau et manteau révélé par les mesures géodétiques de nutation de la Terre. Cette frontière abrite une couche limite de Hartmann/Ekman.

À une échelle plus globale, la turbulence pourrait être fortement dominée par la rotation jusqu'à être quasi-géostrophique. Une expérience de formation d'une colonne de Taylor a été étudiée pour observer comment les sondes inertielles mettent en place la géostrophie. En particulier, le temps de mise en place de la géostrophie est inversement proportionnel au diamètre de la colonne. Ce qui place une contrainte forte pour l'existence de la turbulence quasi-géostrophique à petite échelle si leur temps de retournement doit rester court par rapport à leur temps de mise en géostrophie.

Il est à noter que même en adoptant un modèle quasi-géostrophique, la turbulence qui en résulte est encore dominée par des ondes, les ondes de Rossby dues à la forme sphérique du noyau liquide. La turbulence (en plan β) est une turbulence 2D anisotrope (Nathanaël Schaeffer et Philippe Cardin, 2005).

Enfin, la dynamique du noyau pourrait être affectée fortement par les ondes de torsion, un exemple d'onde d'Alfvén. Les cylindres géostrophiques du noyau seraient couplés entre eux par le champ magnétique radial (en coordonnées cylindrique).

Guillevic Lamaison présente ses travaux numériques sur les fermetures en 2 points et la prédiction du bruit aérodynamique. Il passe en revue les différentes méthodes utilisées pour calculer le bruit. Les méthodes directes (DNS ou LES) s'attaquent au problème couplé aérodynamique et acoustique en résolvant simultanément l'ensemble des interactions. Leur coût de calcul constitue un inconvénient majeur. Les méthodes hybrides partent d'un champ de vitesse stationnaire ou instationnaire à partir desquels les termes source de bruits sont calculés après quoi le rayonnement acoustique est calculé.

En conditions isothermes, les termes sources ne dépendent que du champ de vitesse fluctuante. La méthode utilisée est celle des modes de Fourier aléatoires (utilisée par Kraichnan 1970, pour la diffusion turbulente). Si le champ de vitesse moyen est calculé par une fermeture en un point, par exemple k, ϵ , on reconstruit un spectre synthétique à partir de ces valeurs de k et ϵ . Ce spectre est discrétisé et le champ turbulent reconstruit en affectant à chaque mode l'amplitude correspondante du spectre. De plus une pulsation est attribuée à chaque mode par un tirage aléatoire. Les sources des ondes acoustiques sont ensuite calculées (avec un succès mitigé) et le rayonnement acoustique calculé.

Guillevic Lamaison tente d'améliorer la méthode des modes de Fourier aléatoires en partant de résultats de fermetures en deux points pour obtenir une détermination plus correcte des sources acoustiques.

Sébastien Galtier clôt le thème 2 en parlant d'écoulements en rotation rapide et d'écoulements EMHD (Electron Magnétohydrodynamique) pour les applications astrophysiques. Ces deux situations présentent des analogies fortes.

Pour la turbulence en rotation, le nombre de Rossby mesure le rapport entre le temps de retournement des grands tourbillons et le temps d'une révolution. Asymptotiquement, le

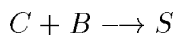
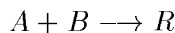
spectre classique en $k^{-5/3}$ est retrouvé pour les grands nombres de Rossby et un spectre en $k_{\perp}^{-5/2} k_{\parallel}^{-1/2}$ pour les petits nombres de Rossby (turbulence d'ondes).

Même si la turbulence semble devenir proche de la bidimensionalité, il est important de garder une bonne résolution numérique dans la direction de la rotation, sans quoi les interactions résonnantes sont mal représentées et le spectre énergétique résultant s'en trouve faussé.

En conclusion, Sébastien Galtier insiste sur l'effet de moyenne (angulaire) sur les spectres qui masque des différences de comportement selon les directions considérées. Il indique aussi l'intérêt d'exploiter les lois de décroissance énergétiques en turbulence d'onde.

Une méthode chimique de mesure qualitative du micromélange a été mise au point par Fournier [1] et Guichardon [2] dans des réacteurs à cuve agitée et par Ferouillat [3] dans les réacteurs continus.

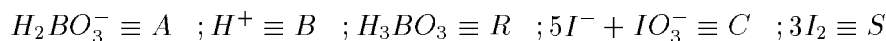
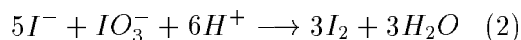
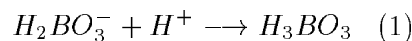
Cette méthode repose sur deux réactions chimiques parallèles concurrentes de type :



Un défaut de B est injecté dans un écoulement (ou dans une cuve) de A et C , il est consommé à la fois par les deux réactions. La réaction $A + B \rightarrow R$ est très rapide devant la réaction $C + B \rightarrow S$ qui a un temps de réaction de l'ordre du temps de micromélange. Le rapport de ce qui est consommé par la deuxième réaction sur la quantité de B injecté définit une mesure X_S qualitative du micromélange.

Si X_S est faible le micromélange est élevé. Si X_S est élevé le micromélange est faible.

La réaction chimique utilisée est la réaction acido-basique de l'acide borique (1) couplée à la réaction redox "iodure/iodate" (2) :



L'objet de cette étude est de donner un sens physique et donc quantitatif à ce X_S afin de relier plus précisément X_S avec les propriétés hydrodynamiques d'un écoulement turbulent (essentiellement la viscosité, le taux de dissipation d'énergie turbulente, les échelles de la turbulence ...). Ce lien se fait par des modèles de micromélange dont les plus connus sont l'échange avec la moyenne (IEM) de Villermaux [4] et le modèle d'engouffrement de Baldyga et Bourne [5].

Pour un modèle de micromélange deux "paramètres" sont à fixer; la vitesse de micromélange déterminée par un temps de micromélange t_m et la phénoménologie du mélange qui va déterminer comment les différentes molécules chimiques vont finalement se mettre en contact (plus précisément comment la turbulence va réduire les échelles des scalaires jusqu'à ce que le processus de diffusion moléculaire devienne prépondérant).

Afin de comparer les différents modèles de micromélange et de faire une étude plus précise de chacun d'eux, la méthode de mesure chimique du micromélange va être mise en œuvre dans une cuve agitée par deux grilles afin d'obtenir en son centre une turbulence quasiment homogène et isotrope balayant un nombre de Reynolds basé sur l'échelle de Taylor de 40 à 140.

L'étude du micromélange se fera dans le cas concret d'un réacteur chimique continu de type HEV.

Bibliographie

- [1] Marie-Christine Fournier. *Caractérisation de l'efficacité de micro-mélange par une nouvelle réaction chimique test*. Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine, 1994.
- [2] Pierrette Guichardon. *Caractérisation chimique du micro-mélange par la réaction Iodure-Iodate*. Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine, 1996.
- [3] S. Ferrouillat. *Etude du micro-mélange pour la caractérisation des performances d'échangeurs-réacteurs compacts multifonctionnels*. Thèse de Doctorat. Ecole doctorale de Nantes, 2004.
- [4] J. Villermaux et J. C. Devillon. Représentation de la coalescence et de la redispersion des domaines de ségrégation dans un fluide par modèle d'interaction phénoménologique. *Proceed. 2nd Ind. Symp. Chem. React. Engin. Amsterdam*, B : 1-13, 1972.
- [5] Jerzy Baldyga et John R. Bourne. *Turbulent Mixing and Chemical Reaction*. Wiley, 2000.

Dynamique de l'alignement du gradient d'un scalaire passif en écoulement bidimensionnel

A. Garcia, M. Gonzalez, L. Danaila et P. Paranthoën
Laboratoire de Thermodynamique, UMR 6614/CORIA

Les propriétés statistiques de l'orientation du gradient d'un scalaire passif sont étudiées de façon lagrangienne à partir de données expérimentales et à l'aide d'un modèle numérique simple.

Dans le cas d'une ligne source de chaleur placée au centre d'une allée de Bénard - von Kármán, on montre que le gradient de température, dans les zones hyperboliques, ne s'aligne pas avec l'orientation d'équilibre prédite par le modèle de Lapeyre *et al.* [Phys. Fluids **11**, 3729 (1999)]. Ce comportement est attribué à l'instationnarité de la topologie de l'écoulement qui se manifeste par les fluctuations du paramètre r mesurant la *persistence* de l'étirement. Ce dernier est défini comme le rapport de la rotation effective (vorticité + rotation du repère propre de l'étirement) à l'intensité, σ , de l'étirement.

L'analyse numérique des propriétés d'alignement du gradient d'un scalaire confirme que l'instationnarité de l'écoulement, associée à un faible niveau d'étirement, conduit à une orientation préférentielle différente de l'orientation théorique prédite par un modèle asymptotique tel que celui de Lapeyre *et al.*. Plus précisément, si T est une échelle caractéristique des variations temporelles lagrangiennes de r alors, pour $\sigma T \gg 1$, l'orientation du gradient est la direction asymptotique déterminée par la valeur instantanée de r conformément au modèle de Lapeyre *et al.*; si σT est faible ou modéré alors, l'orientation préférentielle du gradient du scalaire est gouvernée par la valeur moyenne de r .

On s'intéresse au "modèle de la tétrade" qui décrit la dynamique du tenseur de gradient de vitesse M en turbulence homogène et isotrope. Ce modèle, proposé en 1999 (Chertkov *et al.*), permet de calculer les statistiques de M en fonction de l'échelle. Il se présente sous la forme d'un système d'équations différentielles ordinaires stochastiques. A cause du grand nombre de degrés de liberté du problème, il est impossible de résoudre simplement ce système par Monte-Carlo. On a donc calculé dans un premier temps les solutions du modèle, sous la forme de distributions de probabilité jointes des invariants Q et R , dans l'approximation semi-classique, valable dans la limite où les bruits sont faibles mais non nuls. Ces résultats ont permis d'élaborer une méthode de résolution plus précise, de type Monte-Carlo. Les solutions du modèle ainsi calculées présentent un excellent accord avec celles calculées par DNS (Chertkov *et al.*, 1999), mais aussi avec des mesures expérimentales (Van der Bos *et al.*, 2002).

M. Chertkov, A. Pumir et B. I. Shraiman, *Lagrangian tetrad dynamics and the phenomenology of turbulence*, Phys. Fluids **11**, 2394 (1999).

F. Van der Bos, B. Tao, C. Meneveau et J. Katz, *Effect of small-scale turbulence motions on the filtered velocity gradient tensor as deduced from holographic particle image velocimetry measurements*, Phys. Fluids **14**, 2456 (2002).

**Equation de diffusion dans l'espace des échelles :
La géométrie des peaux entropiques**

Nous avons montré que l'évolution dans la gamme des échelles de nombreux systèmes multi-échelle actuellement étudiés dans des domaines très variés de la physique (champs géophysiques, interfaces turbulentes, flammes turbulentes, énergétique) répond à une équation de l'entropie d'échelle (*Proc. Roy. Soc. Lond.* **459**, 3043 (2003)). Cette équation de diffusion formellement identique à l'équation de la chaleur est donc des plus intéressantes car elle ramène l'étude des géométries dites multi-échelle vers un champ de la physique qui n'est plus simplement géométrique ou statistique mais lié à la thermodynamique et, plus particulièrement, au second principe. Le cas ultra-particulier de la fractalité est obtenu pour une équation de diffusion avec un puits nul et en régime permanent. Un autre cas particulier est obtenu pour une équipartition du puits d'entropie dans l'espace des échelles menant à une courbe d'analyse en échelle parabolique expliquant par la même les nombreuses déviations à l'invariance d'échelle constatées depuis l'introduction de la géométrie fractale. La notion de diffusivité d'échelle (quantité nouvelle en physique) permet d'accéder à une véritable dynamique d'échelle. Cette équation de diffusion dans l'espace des échelles est la première de ce type à proposer une manière simple de suivre échelle par échelle et en fonction du temps (grâce à la notion de diffusivité d'échelle) les caractéristiques d'un système multi-échelle. Des applications spécifiques à la turbulence ont été présentées.

GDR “Structure de la Turbulence et Mélange”

Compte-Rendu de la session “hors thème” (5 avril 2005).

L. Chevillard (LEGI, Grenoble) et W. Bos (LMFA, Lyon)

Compilé par F. Moisy

Trois exposés ont été présentés durant cette session : ceux de N. Mazellier et de L. Chevillard, portant sur les statistiques des modes de Fourier de la vorticité, et celui de W. Bos, sur la dynamique non visqueuse du spectre d’énergie dans un domaine spectral tronqué.

1 Statistique des modes de Fourier de la vorticité : intermittence et corrélations à longue portée

N. Mazellier, L. Chevillard, C. Poulain, Y. Gagne et C. Baudet
Laboratoire des écoulements Géophysiques et Industriels, Grenoble.

En turbulence pleinement développée, la plupart des travaux théoriques et expérimentaux [1] se focalisent sur les statistiques des incréments longitudinaux de vitesse Eulérienne dans l’espace physique, $\delta_\ell u(x) = u(x + \ell) - u(x)$. Ainsi, il est aujourd’hui largement admis que le signal de vitesse longitudinale est intermittent : les fonctions de structures se comportent comme une loi de puissance avec l’échelle ℓ , $\langle (\delta_\ell u)^q \rangle \sim \ell^{\zeta_q^u}$, avec ζ_q^u une fonction non-linéaire de q . Dans l’espace de Fourier, de nombreux travaux théoriques [2] traitent des statistiques des modes de Fourier de la vitesse, mais peu d’études numériques ou expérimentales ont été réalisées afin de confirmer les prédictions émises notamment par Kraichnan. Le phénomène d’intermittence est encore aujourd’hui une question ouverte dans l’espace de Fourier [3]. D’un point de vue expérimental, les mesures directes de la transformée de Fourier de la vitesse (ou de la vorticité) sont rares.

La diffusion acoustique permet de mesurer directement la vorticité dans l’espace de Fourier. En analogie avec le phénomène bien connu de la diffusion de la lumière, le mécanisme physique responsable de la diffusion acoustique par la vorticité peut être vu de la manière suivante [4, 5] : le champ de vitesse oscillant d’une onde acoustique advecte non-linéairement le champ de vorticité. Les fluctuations de vorticité ainsi induites jouent le rôle d’une source acoustique secondaire, responsable de l’émission d’une onde acoustique diffusée. L’équipe du L.E.G.I.   Grenoble a développé une technique expérimentale permettant de mesurer l’onde ainsi diffusée (voir [6] pour une description du dispositif expérimental).

L’écoulement étudié est un jet axisymétrique en régime de turbulence développée ($R_\lambda \simeq 400$, figure 1a). Le volume de mesure, défini comme l’intersection des faisceaux acoustiques incident et détecté (noté V_{scat} , représenté en rouge), peut être déplacé long de l’axe du jet. Le signal résultant est la transformée de Fourier à court-terme (i.e. volume fini) du champ de vorticité $\Omega(\vec{r}, t)$:

$$\Omega_\ell(k, t) = \iiint_{V_{\text{scat}}} \Omega(\vec{r}, t) e^{-i\vec{k} \cdot \vec{r}} d^3r, \quad (1)$$

où $\ell \sim (V_{\text{scat}})^{1/3}$. Le jet est un écoulement très particulier et a la propriété de garder un nombre de Reynolds $\mathcal{R}_e = \sigma L / \nu$ constant le long de son axe. Ainsi, l’échelle de décorrélation L est inversement proportionnelle à l’écart-type de la vitesse σ .

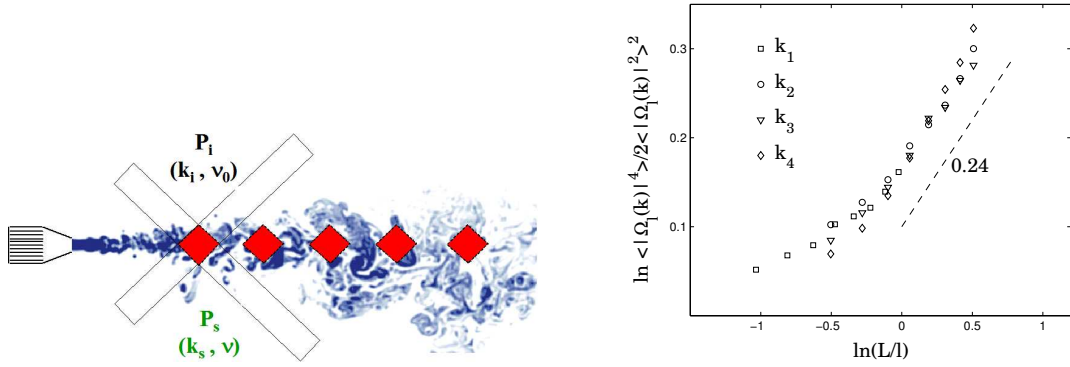


Figure 1: (a) Expérience de diffusion acoustique dans un écoulement de jet turbulent. Le volume (fini) de mesure (en rouge) peut être déplacé le long de l'axe du jet. La photo du jet a été réalisée par Dimotakis. (b) Flatness du module de la vorticité dans l'espace de Fourier, pour quatre vecteurs d'onde de la zone inertielle du jet, en fonction de $\ln(L/\ell)$, où L est l'échelle de décorrélation de la vitesse le long de l'axe du jet, et ℓ la dimension caractéristique du volume de mesure.

Le logarithme de la flatness des amplitudes de la vorticité,

$$F(L/\ell) = \frac{\langle |\Omega_\ell(k, t)|^4 \rangle}{\langle |\Omega_\ell(k, t)|^2 \rangle^2}, \quad (2)$$

est représenté en figure 1b en fonction de $\ln(L/\ell)$ pour plusieurs vecteurs d'onde inertiels k_i , $i = 1, 2, 3$ et 4. L'échelle ℓ est fixée par le volume de mesure, tandis que l'échelle de décorrélation de la vitesse L augmente linéairement le long de l'axe du jet. On remarque tout d'abord que la flatness est indépendante du vecteur d'onde k_i , en cohérence avec les travaux de Brun et Pumir [3]. Ainsi, contrairement au comportement de la flatness dans l'espace physique, cette dernière ne se comporte pas comme une loi de puissance vis à vis de l'échelle k_i^{-1} : le phénomène d'intermittence ne se situe pas, au premier ordre, dans l'espace des k . Ensuite, la flatness se comporte comme une loi de puissance vis à vis de l'échelle, $F(L/\ell) \sim (L/\ell)^\alpha$, avec $\alpha \approx 0.24$. On peut montrer que ce coefficient α est relié au spectre ζ_q^Ω à trois dimensions de la vorticité : $\alpha = 2\zeta_2^\Omega - \zeta_4^\Omega$, et est une signature des corrélations à longue portée [7].

Une étude indépendante de l'intermittence de la vorticité considérée comme un champ de vecteurs, obtenue par simulation directe des équations de Navier-Stokes, a été effectuée par Kestener et Arneodo [8]. Ces auteurs concluent que le champ de vorticité est intermittent et le spectre d'exposants est tel que $2\zeta_2^\Omega - \zeta_4^\Omega = 0.22 \pm 0.016$, en cohérence complète avec les estimations présentées ici, bien que leur étude numérique ne démontre pas l'existence des corrélations à longue portée. Ces travaux du LEGI tendent donc à montrer, pour la première fois, que la vorticité est corrélée à longue portée et intermittente.

2 Dynamique non visqueuse du spectre d'énergie cinétique dans un domaine spectral tronqué

Wouter Bos et Jean-Pierre Bertoglio

Laboratoire de Mécanique des Fluides et Acoustique, Ecole Centrale Lyon.

Le comportement d'une turbulence isotrope pour un fluide incompressible non visqueux (équation d'Euler) est examiné dans un domaine spectral tronqué. Dans ce cas, une DNS effectuée par Cichowlas, Bonaiti, Debbasch et Brachet (2005)[9] et présentée lors de la précédente réunion du GDR (Paris, 25-26 novembre 2004), a mis en évidence des phénomènes intéressants : le spectre d'énergie cinétique, initialisé aux grandes échelles, développe une zone de cascade avec une pente proche de $-5/3$. Quand cette zone est étendue jusqu'à la troncature spectrale, une zone

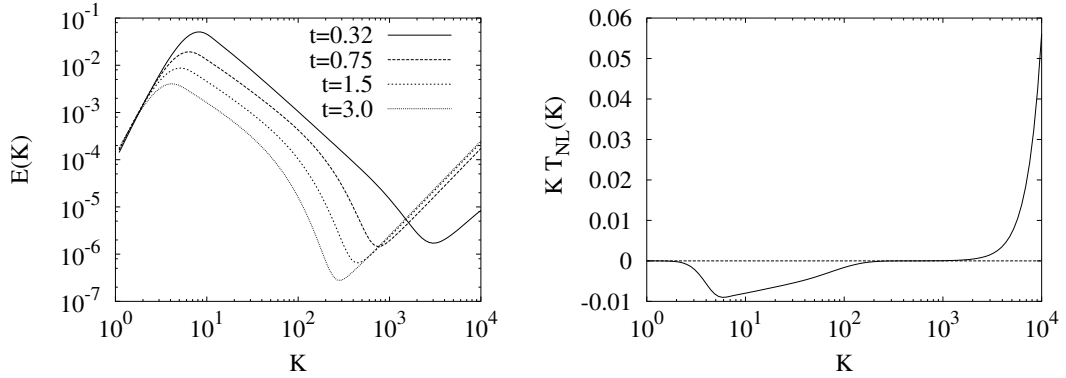


Figure 2: (a) Spectre d'énergie. (b) Transfert non linéaire.

d'équipartition d'énergie, correspondant à un spectre en K^2 , se développe. Entre la zone de cascade et la zone d'équipartition un minimum local du spectre existe.

W. Bos et J.-P. Bertoglio montrent que la fermeture EDQNM peut reproduire le comportement observé dans la DNS. Ensuite, un calcul sur une large plage spectrale est effectué (ce calcul correspondrait à une résolution de 30.000^3 en DNS). Les résultats sont illustrés en figure 2, où sont respectivement représentés le spectre d'énergie $E(K)$ et le transfert non linéaire, $T_{NL}(K)$. Ce calcul permet de trancher entre deux estimateurs, proposés par Cichowlas *et al.*[9] pour le minimum du spectre. Le premier est obtenu en calculant l'intersection de la zone de cascade avec la zone d'équipartition. Le second prend en compte l'existence d'une zone de type 'dissipative' à la fin de la zone inertielle. Les résultats de la fermeture montrent que l'estimateur dissipatif est le plus approprié.

References

- [1] U. Frisch, *Turbulence, The Legacy of A.N. Kolmogorov*, Cambridge University Press, Cambridge (1995).
- [2] A. M. Monin and A. S. Yaglom, *Statistical Fluid Mechanics*, MIT Press, Cambridge (1971).
- [3] C. Brun & A. Pumir, Phys. Rev. E **63**, 056313 (2001)
- [4] G. K. Batchelor, in *Symposium on Naval Hydrodynamics* F. S. Sherman (ed.), National Academy of Sciences, Washington, 403 (1957).
- [5] F. Lund and C. Rojas, Physica D **37**, 508 (1989).
- [6] C. Poulain, N. Mazellier, P. Gervais, Y. Gagne & C. Baudet, Flow, Turb. and Comb. **72**, 245 (2004).
- [7] M. E. Cates & J. M. Deutsch, Phys. Rev. A **35**, 4907 (1987).
- [8] P. Kestener & A. Arneodo, Phys. Rev. Lett. **93**, 044501 (2004).
- [9] C. Cichowlas, P. Bonaiti, F. Debbasch & M. Brachet, arXiv.org:nlin/0410064 (20050310)

GDR 2865 : « Structure de la turbulence et Mélange »

9 - 10 Novembre 2005

ISITEM et Ecole Centrale, Nantes

*Organisateurs locaux: Pascal Dupont, Dominique Della Valle
et Gérard Delhommeau*

Thèmes abordés :

- **Mélange**

Animateurs: Mikhaïl Gorokhovski et Michel Gonzales

Compte-rendu par Thierry Dupont et Michel Gonzalez

- **Ecoulements tournants 3D**

Animateur: Frédéric Moisy

Compte-rendu par Sébastien Poncet

- **Modèles de turbulence, application dans l'hydrodynamique navale**

Animateur: Gambo Deng

Compte-rendu par Anne Cadiou

- **Divers**

La session consacrée au mélange a été ouverte par une communication de Mikhail Gorokhovski sur les « modèles stochastiques de mélanges sous-maille ». Si les champs de vitesse sont des fonctions continues du temps et de l'espace, des bifurcations brutales peuvent apparaître dans les trajectoires de particules fluides ou solides quand on intègre les résultats en temps. Ainsi si les fluctuations de vitesse ont des distributions quasi-gaussiennes, il n'en est pas de même de la distance entre deux particules ni de leurs accélérations ! Ces résultats ont été mis en évidence dans des expériences à l'ENS de Lyon (Pinton). Actuellement les modèles sous-mailles utilisés en modélisation des grandes échelles ne permettent pas de reproduire cette réalité. Il est possible de dériver différentes équations de pdf des accélérations faciles à mettre en oeuvre dans une simulation LES et qui permettent de reproduire correctement les problèmes de mélanges aux échelles n'ont résolues par les équations déterministes.

[Olivier Cadot](#) a présenté un état d'avancement sur une expérience originale de turbulence produite entre deux disques contrarotatifs (dispositif nommé de « machines à laver »). L'objectif est d'analyser les temps caractéristiques de transferts d'énergies entre les grandes échelles modulées par la rotation des disques et les petites échelles produisant de la chaleur. Une thermistance rapide a permis de mesurer des pics de productions de chaleur à la fréquence de modulation et l'analyse des différents temps caractéristiques (cascade-dissipation-transport) est en cours.

Deux interventions ont porté sur la dispersion de particules en écoulement turbulent. [Mickaël Bourgoïn](#) a présenté des résultats de mesures lagrangiennes 3D à haute résolution sur la dispersion de paires de particules dans un écoulement de von Karman. Le résultat marquant de ce travail est l'évolution suivant une loi de type Batchelor de la moyenne quadratique de la séparation des paires de particules et l'absence de régime de type Richardson.

La présentation de [Wouter Bos](#) concernait l'application à la dispersion de particules individuelles d'une modélisation EDQNM du mélange d'un scalaire passif. Cette extension est valide dans la mesure où un traceur passif peut être représenté par un scalaire passif non-diffusif. La modélisation utilisée est une généralisation récente d'EDQNM au cas de la turbulence homogène en présence d'un gradient moyen du scalaire. L'étude de la variance du déplacement d'une particule montre que les lois classiques de dispersion sont reproduites par la fermeture EDQNM, aussi bien en turbulence isotrope qu'en turbulence cisailée homogène.

Puis deux communications sur le mélange en fluides stratifiés ont été présentées par [Yannis Cuypers](#) et Pascal Dupont. Le premier a présenté une étude du Lac du Bourget avec des mesures de profils de température montrant la mise en place d'une thermocline pendant l'été et le passage d'ondes de gravité pouvant être responsable de mélanges entre l'eau profonde et l'eau de surface. La dynamique de ces ondes semblent pouvoir être modélisées par une équation de Korteweg-De Vries. La seconde présentation a décrit des expériences de laboratoire permettant l'analyse des transferts de chaleur et de masse dans de telles interfaces stratifiées en fonction de l'écart de densité, de l'intensité de la turbulence et du coefficient de diffusion moléculaire. Cette reprise des expériences historiques de Huppert et Turner permet de comprendre que la stratification contrôle la taille maximale des structures responsables du transfert et que la diffusion moléculaire modifie l'influence des plus petites échelles. La question de cette configuration dans les études de micromélanges a donc été évoquée puisqu'une étude de micromélange par une turbulence de grille oscillante similaire est en cours à Nantes.

Deux communications sur le mélange par chaos lagrangien ont terminé ce thème sur le mélange. Mlle [Emmanuelle Gouillart](#) a présenté une méthode d'analyse innovante des mélanges chaotiques en écoulement fermé 2D par la théorie mathématique des tresses. L'obtention d'une entropie topologique ainsi que le calcul du taux d'étirement d'une ligne matérielle sont directs mais il n'existe pas de méthode générale pour associer une tresse à un protocole de mélange. Puis Ahmed Ould el Moctar a présenté des résultats à la fois expérimentaux et numériques sur l'influence de petites modifications d'un protocole donné : mouvement circulaire d'un vortex dans une cavité circulaire. Le diagramme des zones chaotiques est présenté en fonction des vitesses l'intensité du vortex et sa vitesse. Un protocole mélangant périodiquement deux régimes différents permet de faire disparaître les îlots non-mélangés est d'obtenir ainsi une remarquable efficacité de mélange.

Pour conclure une discussion sur les interactions entre le monde du mélange turbulent et celui du mélange lagrangien a été lancé par Philippe Petitjeans. Bien sûr les outils utilisés sont très différents mais les objectifs de quantification du mélange sont très voisins... Il doit y avoir un essai d'utiliser la même méthode de mesure de micromélange par réaction chimique dans ces deux configurations au sein de l'AC-PR2.1 (programme énergie) de Hassan Peerhossaini et Dominique Della Valle.

Tout le monde est d'accord sur l'intérêt de dédier officiellement une session sur les réelles différences de ces deux configurations dans une prochaine réunion du GdR.

GDR Structure de la turbulence et mélange

Thème 2 : Écoulements tournants 3D

9-10 novembre 2005 à Nantes

Animateur : Frédéric Moisy (FAST)

Compilé par Sébastien Poncet (IRPHE)

Cette session aborde quelques aspects de l'état de l'art des écoulements tournants 3D. Deux configurations ont été plus particulièrement abordées : celle de la "machine à laver" et celle des écoulements de type rotor-stator avec faible entrefer.

1 Partie I : la "machine à laver"

Olivier Cadot (ENSTA) a présenté l'état d'avancement d'une revue sur la "machine à laver" intitulée *Advances in turbulence using the Von Kármán closed flow geometry* qui doit être soumise pour publication dans l'édition de 2006 (ou de 2007) de *Ann. Rev. Fluid Mech.*. Cet article regroupe, pour l'instant, près de 100 références et se décompose ainsi :

1. Basic flow (12 références)
2. Vorticity filament-pressure statistics (18)
3. Velocity gradient statistics (16)
4. Energy injection rate statistics (19)
5. Drag reduction by polymer additives (4)
6. Passive scalar statistics (4)
7. Lagrangian turbulence (11)
8. Superfluid turbulence (3)
9. MHD turbulence (12)

Romain Monchaux et Bérangère Dubrulle du laboratoire GIT au CEA Saclay ont développé de nouveaux principes variationnels pour étudier la structure et la stabilité des états d'équilibre des écoulements axisymétriques. Ils montrent que les équations d'Euler axisymétriques pour les écoulements inviscides admettent une infinité de solutions stationnaires. Ils exhibent leur forme générale et développent quelques solutions particulières. Ils montrent que les états stationnaires stables maximisent une H-fonction (non universelle) tout en conservant l'énergie, l'hélicité, la circulation et le moment cinétique (contraintes robustes). Ceci peut être vu comme une sorte de principe de "selective decay" généralisé. Ils calculent les équations de relaxation qui peuvent être utilisées comme un algorithme pour construire des solutions non-linéaires dynamiquement stables des écoulements axisymétriques. Ils développent également une approche thermodynamique des états d'équilibre à une certaine échelle de coarse-graining. Ils montrent que les distributions correspondantes peuvent être rangées en deux parties : une part universelle issue de la conservation des contraintes robustes et une part non universelle déterminée par les conditions initiales au travers des contraintes faibles (pour les systèmes évoluant librement) ou par une distribution à priori prenant en compte les effets non-idéaux tels que la viscosité, le forçage à petite échelle et la dissipation (pour les systèmes forcés). Finalement, ils calculent une paramétrisation du mélange sans viscosité pour décrire la dynamique du système à une certaine échelle de coarse-graining. Un des grands intérêts de ce modèle axisymétrique est sa situation intermédiaire entre les cas 2D et 3D. Ils présentent de plus une confrontation des prédictions relatives aux états stationnaires de l'équation d'Euler axisymétrique à des mesures expérimentales effectuées dans un écoulement de Von Kármán. Dans ce cas, les états stationnaires sont censés être décrits par

des relations simples entre la vorticité, le moment cinétique et la fonction de courant. Les mesures sont faites à l'aide d'un système de vélocimétrie laser doppler (LDV). Une comparaison entre le comportement de l'écoulement de von Kármán et l'écoulement de Beltrami quand le nombre de Reynolds augmente est aussi présentée.

Monchaux R., Leprovost N., Ravelet F., Dubrulle B., Chavannis P.H., Daviaud F. (2005), Statistic Mechanical of axisymmetric turbulent flows, soumis à Phys. Rev. Lett.

François Daviaud (GIT - CEA Saclay) a discuté de l'influence de la turbulence sur le seuil de la dynamo. L'effet dynamo est la génération d'un champ magnétique par le déplacement d'un milieu conducteur. Quand le milieu conducteur est un fluide, l'effet dynamo résulte d'une competition entre les étirements et repliements de champ par le fluide, et la diffusion, quantifiée par un nombre sans dimension, le nombre de Reynolds magnétique Rm . Quand le fluide est laminaire, l'effet dynamo peut être traité comme une instabilité classique, avec apparition de la dynamo dès que Rm dépasse un certain seuil Rm_c . Lorsque le fluide est turbulent, les approches numérique et analytique du problème se heurtent aux mêmes problèmes que pour la turbulence classique. Ceci a motivé la mise en route d'expériences de laboratoire utilisant du sodium liquide pour étudier l'influence de la turbulence sur le seuil de l'effet dynamo. Il y a cinq ans, deux expériences à Riga et à Karlsruhe ont démontré que lorsque la turbulence n'était qu'à petite chelle (rendant l'écoulement instantané proche de l'état moyen), les seuils d'apparition de dynamo étaient très proches des seuils calculés avec l'écoulement moyen. Deux expériences plus récentes utilisant des écoulements non-contraints (  Madison et à Cadarache) semblent montrer qu'au contraire, lorsque l'écoulement turbulent possède des instationarit s à grande échelle, le seuil est plus élevé que celui calculé avec l'écoulement moyen. Motivés par ces remarques, François Daviaud a entrepris une étude numérique simplifiée du système en remplaçant la turbulence par un bruit d'amplitude, de temps de corrélation et d'échelle arbitraire. Il a observé qu'un bruit à petite échelle ne modifie pratiquement pas le seuil d'apparition de la dynamo, alors qu'un bruit à grande échelle augmente sensiblement le seuil de l'effet dynamo, et ce d'autant plus que son temps de corrélation est élevé. Ce résultat confirme donc qualitativement les premières mesures expérimentales, et semble suggérer que les dynamos naturelles n'opèrent que grâce à la présence de la force de Coriolis, qui dompte les fluctuations à grande échelle.

2 Partie II : les écoulements de type rotor-stator

Olivier Daube (LIMSI) a présenté des simulations numériques axisymétriques des écoulements transitionnel et chaotique dans une cavité de type rotor-stator de rapport d'aspect 1/8 pour un nombre de Reynolds global allant jusqu'à $Re = 10^6$. Les limitations et les conséquences de l'hypothèse d'axisymétrie ont d'abord été discutées. La dynamique de l'écoulement consiste principalement en des ondes se propageant dans les couches limites liées au rotor et au stator et en des ondes inertielles dans le coeur de l'écoulement. Pour $Re = 3 \times 10^5$, la couche liée au rotor est stationnaire, alors que des fluctuations de large amplitude sont observées du côté du stator. L'évolution des moments d'ordre 2 confirme le rôle fondamentalement axisymétrique des 2 couches limites. L'analyse de la contribution des différents termes intervenant dans l'équation de l'énergie cinétique fait apparaître quelques traits spécifiques attribués aux effets de la rotation et à l'hypothèse d'axisymétrie.

Jacques R., Le Quéré P., Daube O. (2002), Axisymmetric numerical simulations of turbulent flow in rotorstator enclosures, International Journal of Heat and Fluid flow, 23, p.381-397.

Éric Serre (MSNM) a fait une synthèse de ses recherches sur les instabilités et la turbulence dans les écoulements de fluide en cavité en rotation étudiés par simulation numérique haute précision (approximation spectrale, algorithmes non itératifs).

Un éclairage récent sur le processus de transition dans les couches limites, qui se développent sur les parois, a été apporté en considérant la réponse à une perturbation brève et localisée dans la région instable de la couche limite. Les travaux théoriques récents consacrés aux couches limites en rotation laissent supposer que le mode absolu d'instabilité joue un rôle important dans le processus d'apparition de la turbulence. Une cavité en rotation d'ensemble soumise à un flux de masse forcé radial centrifuge a été considérée car elle correspond au cadre théorique des instabilités convectives/absolues.

Le travail expérimental et théorique de Lingwood (JFM 95-97) a été étendu au cas interdisque. Les modes I et II convectifs ont été complètement caractérisés et les premières informations concernant le mode I absolu ont été présentées, mais demandent de très grandes résolutions numériques. En régime turbulent, des résultats de DNS et de LES ont été présentés et confirment la présence de vortex d'instabilité de grande échelle dans le coeur de l'écoulement, persistants à très hauts Reynolds d'après des études expérimentales complémentaires réalisées à l'Université de Manchester. D'un point de vue statistique, l'analyse du tenseur de Reynolds présente toutes les caractéristiques d'une couche limite turbulente et montre l'anisotropie de la turbulence dans ces écoulements. Une analyse comparative avec des résultats issus d'une approche statistique (Univ. Manchester) montre que des modèles du second ordre sont nécessaires pour reproduire assez fidèlement les calculs issus de la simulation directe.

Des résultats récents encourageants ont été également présentés concernant une LES d'un écoulement rotor-stator, basée sur une technique de stabilisation (Spectral Vanishing Viscosity) qui permet de conserver la précision spectrale de notre solveur.

Enfin, Eric Serre s'est intéressé à la convection de Rayleigh-Bénard en rotation qui est depuis longtemps un des sujets favoris dans la dynamique des fluides non linéaire. En effet, l'addition de la force de Coriolis dans les équations du mouvement (Navier-Stokes) rend le système non potentiel, même au seuil. Un des phénomènes fascinants est le chaos spatio-temporel où les structures de convection possèdent une dynamique complètement désordonnée. Il a présenté des résultats relatifs à des structures de convection carrées, obtenues pour la première fois numériquement avec des conditions de bord réalistes.

Serre E., Bontoux P., Launder B. (2004) Transitional-turbulent flow with heat transfer in a closed rotor-stator cavity, J. of Turbulence, 5, p.008.

Séverac E., Serre E., Pasquetti R., Launder B. (2004), A stabilization technique to study turbulent rotating flows using high-order numerical method, Advances in Turbulence X, 861, CIMNE, Eds. H.I. Andersson, P.A. Krogstad, Barcelona.

Serre E., Tuliska-Sznitko E., Bontoux P (2004), Coupled theoretical and numerical study of the flow transition between a rotating and a stationary disk, Phys. Fluids, 16(3), p.688-706.

Sanchez J.J., Serre E., Crespo del Arco E., Busse F. (2005), Square patterns in rotating Rayleigh-Bénard convection, Phys. Rev. E, 72, 036307.

Sébastien Poncet (IRPHE) a proposé une étude expérimentale et numérique sur la caractérisation des écoulements turbulents de type rotor-stator soumis à un flux axial. Des mesures de vitesse par LDA sont comparées aux prévisions d'un modèle avancé de transport des tensions de Reynolds essentiellement pour les écoulements turbulents à couches limites séparées. Cette confrontation a permis d'approfondir les propriétés des écoulements confinés soumis à une forte rotation. Dans le cas d'une cavité fermée ou lorsqu'un flux centripète est imposé, la structuration de l'écoulement est de type Batchelor : la couche limite du rotor et celle du stator sont séparées par un noyau central en rotation. La vitesse tangentielle dans le noyau est proportionnelle à la vitesse locale du disque avec un coefficient de proportionnalité K . Ce coefficient peut être déterminé à partir d'un coefficient local de débit selon une loi analytique dont les deux coefficients dépendent uniquement du taux de prérotation du fluide. Cette loi est indépendante de la géométrie de la cavité. La même démarche a été appliquée aux écoulements laminares et aux écoulements turbulents avec rotor rugueux. Pour de forts flux centrifuges, la structuration de l'écoulement devient de type Stewartson avec une couche limite unique sur le rotor. La transition entre ces deux structururations peut être caractérisée par un nombre de Rossby basé sur l'espace radial entre le rotor et le cylindre extérieur. Cette transition est continue et indépendante de la géométrie de la cavité. La turbulence est concentrée dans les couches limites et augmente du centre vers la périphérie du disque. Lorsqu'un flux est imposé, la zone relaminarisée proche de l'axe observée en cavité fermée, disparaît et la turbulence est maximale près des zones d'entrée et de sortie du fluide. La turbulence est fortement anisotrope au sens des vitesses dans les couches limites et devient quasi isotrope dans le coeur près de la couche limite du rotor. L'analyse de l'anisotropie directionnelle montre que la turbulence est 2D avec des structures orientées selon l'axe de rotation.

Poncet S., Chauve M.-P., Le Gal, P. (2005), Turbulent Rotating Disk Flow with Inward Throughflow, J. Fluid Mech., 522, p.253-262.

Poncet S., Chauve M.-P., Schiestel R. (2005), Batchelor versus Stewartson flow structures in a rotor-stator cavity with throughflow, Phys. Fluids, 17 (7).

GDR Structure de la turbulence et mélange

Compte rendu du thème 3

Ecole Centrale de Nantes (10 Novembre 2005)

Animateur : Ganbo Deng

Intervenants : Ganbo Deng, Rémi Manceau

Compilé par Anne Cadiou

Cette session aborde quelques aspects de l'état de l'art en modélisation statistique de la turbulence en un point à travers deux exposés.

Modélisation de la turbulence - application en hydrodynamique navale

Ganbo Deng, Laboratoire de Mécanique des Fluides, Ecole Centrale de Nantes

Les écoulements autour de navires présentent les caractéristiques spécifiques associées à la géométrie allongée des carènes : l'écoulement transitionne rapidement à l'avant du navire, et devient particulièrement complexe à l'arrière du navire où se développent des couches limites tridimensionnelles, soumises à des gradients de pression adverses, dans une géométrie présentant de fortes courbures et conduisant au développement de tourbillons longitudinaux intenses. Ces écoulements évoluent à des nombres de Reynolds élevés (de l'ordre de 10^6), et la prise en compte de ces différents mécanismes dans les simulations numériques nécessite une modélisation fine de ce qui se passe dans l'écoulement jusqu'à la paroi.

Les simulations numériques autour de carènes de navire poursuit principalement deux objectifs pratiques : le calcul de la traînée et la connaissance de la topologie de l'écoulement dans le plan de travail de l'hélice. L'optimisation des formes de carènes repose donc sur un compromis permanent entre la réduction de la traînée et l'amélioration des conditions de propulsion.

A l'heure actuelle, les méthodes numériques qui permettent d'aborder ce type d'écoulement ont atteint un degré de maturité relativement universel, comme l'atteste le récent CFDWS Workshop de Tokyo (2005) où les simulations réalisées avec un même maillage, un même modèle, mais différents codes conduisent aux mêmes résultats. L'influence du modèle de turbulence est en revanche déterminante dans la qualité des résultats, ce qui permet de passer en revue les différentes classes de modèles utilisées dans la communauté.

Les modèles les plus fréquents sont les modèles algébriques de type Baldwin-Lomax, le modèle à une équation de Spalart-Allmaras, et la classe des modèles à deux équations de type $K - \varepsilon$, $K - \omega$, avec un regain d'intérêt pour les modèles basés sur d'autres échelles, comme $K - \Phi$ ou $K - KL$, ou le modèle $\bar{v}^2 - f$ de Durbin. La classe des modèles au second ordre de type $R_{ij} - \varepsilon$ s'étend des formulations les plus simples, aux fermetures sophistiquées fortement non-linéaires. Dans ces modèles, la diffusion par viscosité et les termes de production d'énergie cinétique turbulente sont exacts, ce qui de fait les rend théoriquement attractifs, mais l'ensemble des autres mécanismes (redistribution, diffusion et dissipation) doit être modélisé de façon cohérente, et associé avec une équation complémentaire pour représenter l'évolution des échelles caractéristiques de la turbulence. Les modèles au second ordre de

type $R_{ij} - \varepsilon$ ou $R_{ij} - \omega$ ne sont pas encore très largement exploités, ce qui rend délicat l'examen des capacités des différentes formulations à traiter les écoulements d'hydrodynamique navale. Les modèles algébriques non-linéaires, en proposant de s'affranchir de l'hypothèse de Boussinesq tout en s'appuyant sur le transport de deux échelles scalaires est un compromis a priori intéressant, et tout particulièrement les modèles de type EASM, qui sont des modèles à deux équations construits à partir des modèles au second ordre.

Le choix d'un modèle plutôt qu'un autre repose bien entendu très largement sur leur capacité à représenter correctement les différents phénomènes physiques qui régissent l'écoulement.

Le développement des couches limites 3D est caractérisé par le fait que le tenseur des taux de déformation du mouvement moyen n'est pas aligné avec les composantes du tenseur de Reynolds, ce qui met en défaut toutes les approches basées sur l'hypothèse de Boussinesq. Un exemple typique d'un tel écoulement est le développement d'un tourbillon en fer à cheval à la jonction d'un cylindre posé sur une plaque plane.

L'action d'un gradient de pression adverse se rencontre dans des couches limites bidimensionnelles et est donc un phénomène très largement répandu. Les résultats montrés par Bézard et al. à la conférence ETMM6 en 2005 montrent pourtant que peu de modèles capturent le bon profil de vitesse et le bon coefficient de frottement.

Pour juger de la capacité des modèles à représenter l'effet de courbures des parois solides, il faut distinguer le cas d'une paroi convexe de celui d'une paroi concave. Dans le premier cas, l'écoulement est stabilisé par la courbure et sa représentation ne pose généralement pas de problème aux modèles dans des applications d'hydrodynamique navale où elle ne s'accompagne pas de décollements brusques et de décrochages comme dans des applications d'aérodynamique externe. Le cas d'une paroi concave est plus complexe, l'écoulement étant déstabilisé avec éventuellement l'apparition de nouvelles structures (Taylor-Görtler). L'écoulement met également un temps plus long à réagir à la présence de la courbure concave, qui doit être traduit dans le modèle. Un exemple typique de ce type d'écoulement est celui d'une conduite coudée. Du fait que leurs termes de production sont exacts, les effets de courbure sont explicitement pris en compte par les modèles au second ordre alors qu'ils doivent être intégrés dans les modèles de type EASM par un terme de correction de courbure.

Une représentation correcte de la formation et du développement de tourbillons longitudinaux présente quelques caractéristiques communes avec la capacité des modèles à capturer des effets de rotation. À l'arrière des navires, dans le plan de l'hélice, la présence des tourbillons longitudinaux est visible sur la forme en crochet des contours de vitesse moyenne. Les modèles EASM linéaires ne voient pas cet écoulement secondaire, alors qu'avec une correction explicite pour prendre en compte des effets de rotation, ils fournissent une réponse bien meilleure. La solution qu'ils fournissent est très voisine de celle du modèle au second ordre présenté (SSG) qui restitue le bon comportement, sans modification explicite particulière, mais au prix d'un effort de calcul deux fois plus élevé.

En résumé, pour aborder des problèmes d'hydrodynamique navale, les différents phénomènes physiques qui régissent l'écoulement sont tous des effets complexes à prendre en compte dans les modèles, et il convient de les classer par ordre d'importance. L'action des gradients de pression adverse semble le moins crucial. Sa restitution est un problème partagé dans de nombreuses applications et d'une façon générale, l'effet des couches limites 3D est un problème difficile à qualifier qui n'est pas spécifique à l'hydrodynamique navale. La prise en compte des effets de courbure est importante, mais n'est pas déterminante, alors qu'une représentation correcte des effets de rotation semble être le point le plus crucial pour les modèles, car c'est un effet à la fois important et déterminant pour une bonne représentation de la topologie dans le plan de l'hélice et des efforts sur la carène.

G. Deng, Three-dimensional flow computation with Reynolds stress and algebraic stress models, ETMM6, Sardinia, Italy, 23-25 May 2005

Effet de la paroi sur la turbulence en modélisation statistique (RANS)

Rémi Manceau, Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques, Poitiers

Cet exposé propose de faire un bilan sur la prise en compte de l'influence des parois par relaxation elliptique dans les modèles statistiques en un point. Ces modèles sont généralement développés et calibrés pour des écoulements turbulents à grand nombre de Reynolds et les fermetures obtenues sont adaptées pour prendre en compte le comportement particulier de la turbulence au voisinage de parois solides en introduisant des fonctions d'amortissement dépendant par exemple du nombre de Reynolds turbulent ou de la distance à la paroi. Une alternative à ces approches heuristiques consiste à calculer l'amortissement comme solution d'une équation elliptique.

L'objectif est d'intégrer dans les modèles statistiques les effets dûs à la présence d'une paroi solide tout en ne retenant dans les fermetures que les termes développés dans l'approximation des grands nombres de Reynolds.

La présence d'une paroi solide modifie l'écoulement et le développement de la turbulence par trois actions principales. L'adhérence du fluide à la paroi rend le rôle de la viscosité prédominant dans la zone de proche paroi et conduit à un amortissement local de toutes les composantes turbulentes. En outre, la présence de la paroi induit un confinement de l'écoulement qui renforce les gradients de vitesse moyenne dans son voisinage proche et conduit par une action non locale à un blocage rendant la turbulence proche d'un état 2C en diminuant les tensions normales dans la direction orthogonale à la paroi et en renforçant les composantes normales dans le plan parallèle à la paroi. Enfin, la présence de la paroi génère un terme d'écho de la fluctuation de pression qui modifie elle aussi la redistribution d'énergie cinétique entre les composantes normales du tenseur de Reynolds par l'intermédiaire des corrélations pression-déformation.

Le développement du modèle elliptique s'appuie sur l'équation de Poisson pour la pression fluctuante pour prendre en compte la modification de ces corrélations et exploite les développements asymptotiques des différents termes intervenant dans le transport des corrélations doubles de fluctuation de vitesse au voisinage d'une paroi, dans le cadre d'un écoulement turbulent développé de canal plan, pour construire une fonction de corrélation non-locale, associée à une échelle de corrélation L , permettant d'écrire une équation de relaxation elliptique de type

$$f_{ij} - L^2 f_{ij,kk} = f_{ij}^h$$

où f_{ij} traduit l'action des corrélations pression-déformation et le terme source s'exprime en fonction des fermetures classiques loin des parois. En couplant ces équations aux équations d'évolution du tenseur de Reynolds, la zone de proche paroi est corrigée par l'intermédiaire de l'équation elliptique, et non explicitement comme dans les modèles de fermeture classiques. Le bon comportement asymptotique aux parois est assuré par les conditions aux limites associées à l'équation de relaxation elliptique. Elles sont prescrites en cherchant à exprimer dans une équation modèle les termes dominants à la paroi, afin de trouver une solution analytique simple. L'importance du choix des conditions aux limites est montrée par comparaison avec les simulations directes de Kim, Moin et Moser du canal plan.

La construction de l'équation elliptique n'est pas unique et dépend de la fonction de corrélation retenue, de l'échelle de corrélation et du couplage avec les mécanismes de redistribution et dissipation dans l'équation du tenseur de Reynolds.

En retenant une équation tensorielle pour le terme de relaxation elliptique, le modèle résultant est constitué d'un système couplé de 13 équations ($R_{ij} - f_{ij} - \varepsilon$) avec des conditions aux limites sur f_{ij} en $1/y^4$ à la paroi. Ces caractéristiques le rendent instable et peu adapté à des applications réalistes. Ce constat a conduit à proposer une formulation plus simple, basée sur une fonction de pondération elliptique, scalaire, dont les conditions aux limites sont de type Dirichlet. Cette stratégie modifie le couplage avec les tenseurs de corrélation pression-déformation et des taux de dissipation de l'équation des corrélations doubles de fluctuation de vitesse et reporte l'anisotropie pariétale de ces termes sur le

choix d'un modèle a priori, l'amortissement étant géré par l'équation de pondération elliptique. Les modèles de proche paroi retenus reprennent des hypothèses de fermeture qui s'inspirent des propositions classiques, dans lesquelles intervient la normale à la paroi. L'estimation de cette normale est un problème complexe à résoudre en vue d'applications en configuration complexe. L'originalité de la proposition consiste à construire une estimation de la normale à partir des gradients de α . Le modèle, associé aux modèles au second ordre classiques (SSG) a été validé dans des simulations de canal plan, avec ou sans rotation et des jets impactants.

Pour réduire encore le nombre d'équations intervenant dans le modèle, une formulation algébrique incorporant l'action de la pondération elliptique par l'intermédiaire d'un tenseur dépendant des normales construites à partir de α a également été proposé. Il permet de retrouver une forme étendue des modèles de type EASM classique et fournit un comportement satisfaisant de l'amortissement des contraintes normales du tenseur de Reynolds dans la direction normale à la paroi. En revanche, l'anisotropie du tenseur et l'estimation de la répartition de l'énergie entre les composantes normales dans le plan de la paroi n'est pas sensiblement améliorée. Une autre approche pour réduire les degrés de liberté des modèles elliptique a été proposée par Durbin avec le modèle $\overline{v^2} - f$, qui consiste à se servir de $\overline{v^2}$ comme d'une échelle caractéristique de la turbulence et l'introduire dans l'expression de la viscosité turbulente comme échelle caractéristique de vitesse, le temps pouvant être estimé par l'échelle classique K/ε ou encore sa pondération en fonction de l'échelle de Kolmogorov suivant $T = \max(K/\varepsilon, C_T(\nu/\varepsilon)^{1/4})$. Ce modèle a été appliqué à de nombreux écoulements complexes et est actuellement intégré dans des codes commerciaux.

R. Manceau, K. Hanjalic, Elliptic blending model: a new near-wall Reynolds-stress turbulence closure, Phys. of Fluids, vol. 14-2, 2002

GDR 2865 : « Structure de la turbulence et Mélange »

6 - 9 Novembre 2006

Nice

Réunion conjointe avec le GDR Bruit Dynamo

Organisateurs locaux: Alain Noullez et Yannick Ponty

Thèmes abordés :

- Présentations des différentes actions ANR au sein de la communauté.

Animateur: Alain Noullez

Compte-rendu par Alain Noullez

- Point sur la turbulence lagrangienne (manips récentes lyonnaises et autres).

Animateur: Mickaël Bourgoin

Compte-rendu par Laurent Chevillard et Mickaël Bourgoin

- Vortex en écoulement turbulent, interaction vortex intense-turbulence, mélange dans ce type d'écoulement.

Animateur: Philippe Petitjeans

Compte-rendu par Pablo Cobelli

- Rôle des grandes échelles; instabilités en présence de bruit (bifurcations dans les milieux turbulents, dynamo à bas Pm).

Animateur: Bérengère Dubrulle

Compte-rendu par Florent Ravelet

- Turbulence et MHD astrophysiques et géophysiques.

Animateur: Roland Grappin

Compte-rendu par Alice Curvoisier

- Transport turbulent (de température, de champ magnétique, de quantité de mouvement, inertiel avec friction).

Animateur: Dario Vincenzi

Compte-rendu par Dario Vincenzi

- Manips et mesures extrêmes ou non intrusives (comment mesurer dans du sodium ou dans de la turbulence super fluide par exemple). Les derniers résultats de VKS et DTS et autres expériences des métaux liquides.

Animateur: Yannick Ponty

Compte-rendu par Nadège Gagnière

- Divers

Animateur: Yves Gagne

Compte-rendu par Pierre Chainais

Compte-Rendu de la session : Approche Lagrangienne de la turbulence

Nice-Maison des séminaires-Novembre 2006

- **Mickaël Bourgoïn**, LEGI, Grenoble

Anisotropie à petite échelle des statistiques de vitesse Lagrangienne.

Collaborateurs: N. Ouellette, H. Xu, E. Bodenschatz.

On s'intéresse dans cette approche à la mesure de la constante C dite de "Kolmogorov" intervenant dans l'écriture de la fonction de structure d'ordre 2 dans un écoulement de Von Kármán contra-rotatif. Plus précisément, $\langle(\delta_\tau v)^2\rangle = C\epsilon\tau$. La définition précédente fait intervenir la dissipation moyenne ϵ et une certaine composante de la vitesse Lagrangienne v . Pour un écoulement parfaitement isotrope, la constante de Kolmogorov ne dépend pas de la direction de la vitesse. Dans l'écoulement contra-rotatif de von Karman, il est mesuré une persistance de l'anisotropie à petite échelle. En effet, les mesures basées sur le suivi de particules Lagrangienne, une méthode développée à Cornell University, montre que la constante de Kolmogorov intervenant dans la fonction de structure de la composante de la vitesse parallèle à l'axe de rotation est plus faible (≈ 5.0) que celles définies à partir des composantes orthogonales à l'axe (≈ 6.2). L'implication de ce phénomène sur les modèles est discutée.

Voir : Ouellette, Xu, Bourgoïn, Bodenschatz, New Journal Physics **8**, 102 (2006).

- **Romain Volk**, ENS Lyon

Dispositif LDV, et mesures de turbulence lagrangienne associées.

Collaborateurs: J.-F. Pinton, A. Petrossian, N. Mordant, M. Bourgoïn.

Une nouvelle technique de mesure est présentée basée sur la vélocimétrie laser doppler étendue. Cette technique se démarque des techniques existantes de part son coût et sa souplesse. Contrairement à la vélocimétrie Doppler classique, ici des faisceaux élargis sont utilisés de sorte à obtenir un volume de mesure permettant de suivre les particules au moins pendant une fraction significative du temps intégral. La démodulation du signal complexe obtenu permet d'accéder à la fréquence doppler, elle-même reliée à la vitesse de la particule. Cette étude, en cours de développement, permet pour l'instant une estimation raisonnable de l'accélération. Il est montré que les mesures sont proches qualitativement des mesures effectuées à Cornell. Cette expérience a pour vocation d'étudier l'influence de la masse et/ou la taille finie des traceurs sur les statistiques de vitesse lagrangienne.

- **Yoann Gasteuil**, ENS Lyon

Résultats préliminaires sur le suivi lagrangien de température en convection thermique turbulente dans un dispositif de Rayleigh Bénard.

Collaborateurs: J.-F. Pinton, W.L. Shew, P. Metz, B. Castaing, F. Chillà, H. Pabiau, M. Gibert.

Cette étude expérimentale propose d'étudier le mouvement de particules instrumentées dans un écoulement convectif d'une cellule fermée de Rayleigh Bénard dans laquelle un gradient de température est imposé. Les particules, contenant une thermistance, communiquent par radio fréquence en modulation d'amplitude et permettent un suivi "lagrangien" (leur taille reste très supérieure à l'échelle de Kolmogorov) de la température dans l'écoulement. Une caméra bon marché permet le suivi de la particule dans l'espace. Ces mesures proposent une nouvelle voie d'attaque du problème de Rayleigh Bénard par le biais de la dynamique Lagrangienne de la température. Le nombre de Nusselt le long des trajectoires est estimé et il est constaté de fortes fluctuations. Il est aussi mis en évidence une différence entre les moyennes Eulériennes et Lagrangiennes, liée notamment à la forte anisotropie de l'écoulement impliquant la non équivalence (ou violation du principe d'ergodicité) des descriptions Eulériennes et Lagrangiennes.

- **Alessandra Lanotte**, CNR ISAC, Lecce (Italie)

Mesure de l'accélération des particules dans les écoulements turbulents.

Collaborateurs : J. Bec, L. Biferale, G. Boffetta, A. Celani, M. Cencini, S. Musacchio, F. Toschi.

Dans l'approximation de Maxey et Riley, des particules massiques bien plus lourdes que le fluide porteur sont advectées passivement par le fluide avec un temps de retard τ . Un nombre de Stokes St_η défini comme le rapport de ce temps de retard sur le temps de Kolmogorov ($St_\eta = 0$ pour des particules lagrangiennes) peut être construit. Il est proposé une étude numérique de ce problème dans un champ de vitesse issu de la simulation

numérique directe des équations de Navier Stokes pour des résolutions allant de 128^3 à 512^3 , et ce pour plusieurs nombres de Stokes. Il est mis en évidence une diminution de la variance de l'accélération des particules inertielles ainsi qu'une atténuation des événements violents et rares, au fur et à mesure que le nombre de Stokes augmente. Afin d'expliquer ces phénomènes, l'importance des mécanismes de concentration préférentielle et de filtrage dû au retard impliqué par l'inertie de la particule. Les simulations sont ensuite comparées à des mesures dans une soufflerie du groupe de Warhaft à Cornell. En prenant en compte la polydispersion des particules, un excellent accord est constaté.

Bec, Biferale, Boffetta, Celani, Cencini, Lanotte, Musacchio, Toschi, J. Fluid Mech. **550**, 349 (2006).

- **Philippe Gervais**, Université de la Rochelle.

Autocorrélation lagrangienne et inhomogénéité.

L'orateur présente le résultat de l'estimation de la fonction d'autocorrélation de la vitesse Lagrangienne à partir de mesures acoustiques dans un jet d'air réalisées à Grenoble, LEGI. L'idée sous jacente est la comparaison des échelles intégrales eulériennes et lagrangiennes, qui dans la littérature, sont souvent traitées de manière contradictoire. Par exemple, il n'existe pas de consensus sur leur définition et leur quotient. L'accent est mis sur la difficulté de cette estimation, notamment due à la finitude des signaux rendant difficile la caractérisation et la définition de la vitesse moyenne, sensible à l'anisotropie du jet et au déclin des fluctuations le long de l'axe.

- **Nauman Qureshi**, LEGI, Grenoble.

Transport turbulent de particules : effets de taille finie.

Collaborateurs : C. Baudet, M. Bourgoïn, A. Cartellier, Y. Gagne.

La diffusion d'ondes acoustiques permet le suivi Lagrangien de vitesse le long de leur trajectoire. Cette technique est appliquée au suivi de bulles de savon, de taille variable ($2 \rightarrow 6$ mm), dans une turbulence de grille. Il est mis en évidence l'intermittence de la vitesse, ainsi que la non-gaussianité des statistiques de l'accélération. Une étude des temps caractéristiques lagrangiens montrent que l'échelle intégrale est essentiellement indépendante de la taille finie des particules. En revanche, le temps dissipatif de coupure de la dynamique des particules à petite échelle croît avec leur taille. De même, Il est observé que la variance de l'accélération des particules diminue lorsque leur taille augmente. Les comportements observés sont en bon accord avec des arguments dans l'esprit de K41.

- **Stéphane Roux**, ENS Lyon.

Analyse multifractale de signaux de vitesse Lagrangien.

Collaborateurs : L. Chevillard, N. Mordant, A. Arneodo, E. Lévêque, J.-F. Pinton.

L'orateur présente une technique générale d'estimation du phénomène d'intermittence en turbulence. Il est souligné que l'estimation obtenue classiquement avec des incréments temporels de vitesse doit être indépendante de l'outil d'analyse. En particulier, l'intermittence ne doit pas dépendre du nombre de moments nuls de l'incrément, ou plus généralement de l'outil multirésolution utilisé. Une analyse généralisée aux incréments d'ordre quelconque des signaux de vitesse lagrangienne obtenu par Nicolas Mordant à l'ENS de Lyon montre l'existence d'exposants de singularité supérieurs à 1, biaisant fondamentalement l'estimation de l'intermittence avec des incréments d'ordre 1. L'implication de l'existence de singularités plus grandes que l'unité est discutée dans le cadre de l'hypothèse de similarité raffinée de Kolmogorov en description eulérienne.

- **Sedina Tsikata**, LPTP, école Polytechnique.

La distribution lagrangienne des déplacements dans un jet turbulent : la diffusion collective.

Collaborateurs : C. Honoré, D. Grésillon.

Il a été observé antérieurement un comportement non gaussien des déplacements dans un plasma turbulent. L'oratrice présente ici les travaux actuels portant sur les déplacements dans un jet turbulent classique. Une technique optique de mesure de diffusion collective est exploitée dans un jet d'air turbulent axisymétrique pour mesurer la fonction caractéristique des déplacements dans la zone de production et la zone inertielle de la turbulence. L'étude de la fonction de corrélation des déplacements par un ajustement d'Ornstein suggère un temps de corrélation dépendant de l'échelle alors qu'un ajustement de Lévy suggère une forte déviation du modèle gaussien aux grandes échelles.

- **Laurent Chevillard**, Johns Hopkins University, Baltimore, USA.

Dynamique Lagrangienne et géométrie statistique en turbulence des fluides : un mécanisme pour l'intermittence.
Collaborateur : C. Meneveau.

La topologie, ou géométrie, locale d'un écoulement turbulent tridimensionnel peut être étudiée au travers du tenseur complet des gradients de vitesse. Un modèle stochastique régissant l'évolution temporelle de ce tenseur le long d'une trajectoire Lagrangienne est proposé. La fermeture des termes de pression et de viscosité fait appel à la déformation locale subit par la particule fluide. La dynamique précédente est forcée à l'aide d'un simple bruit Gaussien et reproduit de nombreuses propriétés géométriques et statistiques observées dans les écoulements tridimensionnels, comme par exemple l'alignement préférentiel de la vorticité, la forme de "perle" (ou "larme") de la probabilité conjointe des invariants R et Q , ainsi que le caractère non gaussien et le comportement intermittent des gradients longitudinaux et transverses de vitesse.

voir: L. Chevillard et C. Meneveau, Phys. Rev. Lett. **97**, 174501 (2006).

- **Jérémie Bec**, Observatoire de la Côte d'Azur, Nice.

Concentrations de particules inertielles dans des écoulements turbulents.

Collaborateurs : L. Biferale, M. Cencini, F. Toschi, A. Lanotte, S. Musacchio.

L'étude numérique, présentée auparavant par Alessandra Lanotte, est ici analysée dans le contexte des concentrations préférentielles (c'est-à-dire inhomogènes) des particules inertielles. Les inhomogénéités sont constatées à toutes les échelles lorsque le nombre de Stokes est de l'ordre de l'unité. Aux petites échelles (dissipatives), la distribution spatiale est multifractale, et ne dépend que du nombre de Stokes. Aux échelles inertielles, l'invariance d'échelle est brisée et la distribution de masse dépend d'un taux de contraction local, et non du nombre de Stokes local. Un mécanisme phénoménologique est proposé pour rendre compte de ces distributions : les particules sont éjectées des structures en rotation et se concentrent dans les régions de fort cisaillement.

Voir : <http://arxiv.org/nlin.CD/0608045>

RÉUNION DES GDR TURBULENCE ET GDR DYNAMO NICE, 6 – 9 NOVEMBRE 2006

RAPPORT SUR LA SESSION NO. 3 : VORTEX EN ÉCOULEMENT TURBULENT, INTERACTION VORTEX INTENSE-TURBULENCE ET MÉLANGE DANS CE TYPE D'ÉCOULEMENT

Animateur : Philippe Petitjeans
Rapport par Pablo Cobelli

TABLE DES MATIÈRES

1. Réaction chimique rapide et champs de concentration multi-échelles par Denis Martinand	1
2. Structures cohérentes, analyses en ondelettes et simulations DNS et CVS par Marie Farge	1
3. Effet des anneaux géants de vorticité sur la turbulence à petite échelle dans un réacteur partiellement mélangé par Luminita Danaila	2
4. Asymétrie cyclone–anticyclone en turbulence en rotation par Frédéric Moisy	2

1. RÉACTION CHIMIQUE RAPIDE ET CHAMPS DE CONCENTRATION MULTI-ÉCHELLES PAR DENIS MARTINAND

Deux espèces chimiques participant à une réaction simple rapide tendent à se ségréguer en taches dans lesquelles ne subsiste qu'un seul des réactifs. Ces taches sont séparées par une frontière dans laquelle les conditions stoechiométriques sont satisfaites et dans laquelle la réaction se fait, alimentée par diffusion. Mélangés par l'advection, cette frontière et les champs de concentration des réactifs peuvent présenter des caractéristiques multi-échelles. A partir de l'état ségrégué, on détermine analytiquement l'évolution avec le temps et les nombres de Peclet et de Damkohler de la longueur de la frontière réactive et du flux diffusif de réactifs à travers cette frontière dans la situation d'un vortex singulier advectant des champs de concentration initialement auto-similaires. Les résultats analytiques sont en bon accord avec ceux obtenus numériquement à partir des équations complètes d'advection-diffusion-réaction.

D. Martinand et C. Vassilicos, ENS-Lyon.

2. STRUCTURES COHÉRENTES, ANALYSES EN ONDELETTES ET SIMULATIONS DNS ET CVS PAR MARIE FARGE

Un algorithme d'analyse en ondelettes est présenté qui permet d'extraire les structures cohérents des écoulements turbulents. Les résultats obtenus par cet algorithme sur la plus grande simulation numérique directe 3D de turbulence homogène et isotrope disponible dans la littérature sont présentés.

Puisqu'il n'y a pas encore une définition clairement admise des structures cohérents pour les écoulements 3D, on suppose qu'elles sont ce qui reste après denoising. L'intérêt de cette étude n'est pas seulement sur les structures elles-mêmes mais aussi sur le bruit, que l'on suppose additif, gaussien et blanc.

Après une brève description de ses principes, l'algorithme est appliqué à un écoulement turbulent 3D homogène et isotrope, forcé à grande échelle et obtenu par simulation numérique directe (DNS) avec une résolution 2048^3 pour un nombre de Reynolds de micro-échelle d'environ $R_\lambda \approx 700$.

Il est montré que les structures cohérentes extraites ainsi contribuent à environ 99% de l'énergie totale et à environ 80% de l'énstrophie totale. Le spectre d'énergie cohérent suit la même loi de puissance que l'énergie totale ($k^{-5/3}$). En revanche, la contribution due à la partie incohérente suit une loi en k^2 , ce qui correspond à une équipartition d'énergie entre tous les modes (en raison de l'hypothèse de bruit blanc). D'ailleurs, il est mis en évidence que les interactions non linéaires constituent un mécanisme de production de bruit.

Finalement, on conclue que la partie cohérente est suffisante pour modéliser la dissipation turbulente, comme en CVS (Coherent Vortex Simulation ; <http://wavelets.ens.fr>).

Marie Farge, ENS Paris.

3. EFFET DES ANNEAUX GÉANTS DE VORTICITÉ SUR LA TURBULENCE À PETITE ÉCHELLE DANS UN RÉACTEUR PARTIELLEMENT MÉLANGÉ PAR LUMINITA DANAILA

Dans un réacteur partiellement mélangé, le fluide est injecté par 16 paires de jets opposés et évacué à travers des parois poreuses. Ce forçage particulier conduit à la création de 16 paires d'anneaux cohérents de vorticité, tournant dans des sens alternativement opposés. Les propriétés du champ moyen de vorticité et d'étirement conduisent à une turbulence en rotation locale, quasi-2D aux grandes échelles. La taille de ces anneaux, L , est 128 fois plus grande que l'échelle de Kolmogorov. L'existence de cascades d'énergie et d' nstrophie directes est mise en évidence pour des échelles plus petites que L , et de cascades inverses pour des échelles plus grandes que L . Dans les anneaux, le champ turbulent est localement homogène et le champ de vorticité reste spatialement corrélé sur des longueurs comparables à L . Les fonctions de structure de la vorticité présentent un comportement analogue à celui reporté pour la turbulence 2D. Une justification de ce comportement a été discutée, en tenant compte des anneaux géants de vorticité.

Luminita Danaila, CORIA, Université de Rouen.

4. ASYMÉTRIE CYCLONE–ANTICYCLONE EN TURBULENCE EN ROTATION PAR FRÉDÉRIC MOISY

Les résultats d’une campagne de mesure de turbulence en rotation, réalisée sur la plateforme Coriolis, à Grenoble (LEGI), sont présentés. Dans cette expérience, une grille de 4 m de large est translatée à vitesse constante dans un canal d’eau de 10 m de long et de 1 m de profondeur, le tout étant embarqué sur la plateforme en rotation (jusqu’à 2 tours par minute). Des mesures de PIV embarquée ont été effectuées afin d’étudier les structures et l’anisotropie de l’écoulement durant le déclin de l’énergie sous l’effet de la rotation d’ensemble.

Une asymétrie entre vorticité cyclonique et anticyclonique est observée, caractérisée par une croissance auto-similaire en temps du coefficient d’asymétrie (skewness) de la vorticité, $S_\omega \propto (\Omega t)^{0.7}$, jusqu’à ce que le régime de dissipation d’Ekman prenne place à temps longs. D’autre part, des mesures du champ de vitesse dans le plan vertical ont permis de mettre en évidence la structuration verticale progressive de la turbulence. Cette structuration a été caractérisée par la croissance des échelles intégrales, et les résultats sont comparés à des prédictions phénoménologiques.

F. Moisy, C. Morize et M. Rabaud (FAST, Orsay) et J. Sommeria (LEGI, Grenoble).

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 contra-rotatif 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 ?

La session a débuté par une introduction de Roland Grappin sur le vent solaire suivie de plusieurs présentations sur ce thème et celui de la modélisation de la turbulence dans un plasma non-collisionnel (R. Grappin, A. Shekochihin, S. Galtier, V. Carbone et F. Sahraoui). Un des problèmes majeurs reste de comprendre la structure de la turbulence dans le vent solaire, en particulier aux échelles où l'approximation fluide n'est plus valable. De grandes avancées sont maintenant possibles dans le domaine des observations où les missions multi-satellites (comme la mission CLUSTER, cf la présentation de F. Sahraoui) permettent d'accéder pour la première fois à la structure spatio-temporelle de la turbulence. Du côté théorique, diverses approches analytiques et numériques ouvrent de nouvelles pistes de recherche (cf les présentations de R. Grappin, modèles fluides de l'atmosphère solaire; A. Shekochihin, modèle hybride fluide et cinétique; S. Galtier, modèle incluant l'effet Hall; V. Carbone).

Roland Grappin — Observatoire de Paris/Meudon, LUTH

Dans son introduction, R. Grappin pose le problème de la simulation de l'atmosphère solaire et de la transition chromosphérique: près de la surface, l'atmosphère froide et dense est peu magnétisée tandis que dans la couronne, très chaude, la dynamique est dominée par le champ magnétique. En particulier, le choix des conditions aux limites à la surface solaire — rigides ou transparentes — est délicate et influence grandement le résultat des simulations numériques. Puis, il contraste le modèle de Gudiksen & Nordlund (ApJ, 2005) (DNS de la base de la couronne solaire, avec chauffage par effet Joule) avec le modèle 1D de Suzuki & Inetsuka (ApJ, 2005), qui simule un domaine plus large et où le chauffage se fait par la dissipation visqueuse des chocs emportés par les ondes d'Alfvén. La réalité se situerait entre les deux et R. Grappin a ensuite présenté le modèle qu'il développe en collaboration avec J. L  orat dans le but de g  n  raliser les calculs de Suzuki & Inetsuka    plusieurs dimensions et d'  tudier en particulier comment les ondes sont filtr  es par les couches successives de l'atmosph  re solaire.

Alexander Shekochihin — DAMTP, University of Cambridge and Imperial College, London

La loi d'  chelle en $k^{-5/3}$ de K41 est observ  e dans de nombreux plasmas astrophysiques. Ce peut   tre expliqu   par la th  orie de Goldreich & Sridhar (1995) sur la turbulence alfv  nique qui conduit    un spectre en $k_{\perp}^{-5/3}$, $k_{\parallel} \sim k_{\perp}^{2/3}$ et rend compte de l'anisotropie de la turbulence en pr  sence d'un champ magn  tique, qui est un ph  nom  ne observ   en astrophysique et dans les DNS de turbulence MHD. Cette anisotropie ($k_{\parallel} \ll k_{\perp}$), coupl  e avec les   quations de la th  orie cin  tique des plasmas, permet de d  velopper une s  rie de mod  les analytiques qui d  crivent les   chelles plus petites que le libre parcours moyen. Au del   du rayon de Larmor des ions, il est possible de construire un mod  le hybride fluide/cin  tique valide ind  pendamment du caract  re collisionnel ou non du plasma. En de   , la cascade turbulente prends la forme d'un cascade d'ondes d'Alfv  n cin  tiques suivant une loi en puissance $k_{\perp}^{-7/3}$, $k_{\parallel} \sim k_{\perp}^{1/3}$ d'apr  s un argument    la K41/GS95.

R  f  rences: *astroph/0507686*; *astroph/0610810*.

S  bastien Galtier — IAS/Universit   Paris-Sud

S. Galtier d  crit le spectre en $E^b(f) \sim f^{-7/3}$ observ   dans le vent solaire en de    de la gyrofr  quence des ions comme une seconde zone inertielle dont la loi de puissance peut   tre expliqu  e en introduisant l'effet Hall dans les   quations de la MHD. D'une part, une approche perturbative de ces   quations conduit    une loi d'  chelles en $E^b(k) \sim k_{\perp}^{-5/2} k_{\parallel}^{-1/2}$ (Galtier, J. Plasma Physics, 2006). D'autre part, des simulations num  riques de turbulence forte utilisant un mod  le en couche conduit    $E^b(k) \sim k^{\alpha}$ avec α compris entre $-7/3$ et $-11/3$ (Galtier & Buchlin, ApJ, 2007). Dans ces deux cas, le spectre se raidit aux petites   chelles (par rapport    K41), comme ce qui est observ   aux hautes fr  quences, et l'approche Hall MHD semble

prometteuse.

Vincenzo Carbone — Università della Calabria

V. Carbone a présenté les résultats de simulations numériques obtenues grâce à un modèle en couche de la turbulence MHD dans le but de reproduire l'intermittence observée dans le vent solaire.

Références: Bruno *et al.* (*Space Science Reviews*, 2006); Bruno & Carbone (<http://www.livingreviews.org>).

Fouad Sahraoui — CETP, Vélizy

F. Sahraoui a présenté les derniers résultats de la mission CLUSTER sur la structure de la turbulence dans la magnétogaine. De telles mesures multi-satellites sont essentielles pour séparer les variations spatiales et temporelles de la turbulence dans les plasmas astrophysiques, pour lesquels l'hypothèse de Taylor n'est pas valable. Les observations montrent que la turbulence est compressible, fortement anisotrope et suit de nouvelles lois d'échelles (différentes de K41 ou IK) qu'il reste à expliquer (Sahraoui *et al.*, PRL, 2006). D'autres mission spatiale de ce genre sont programmées ou en cours de préparation.

Barbara Bigot — Observatoire de Nice

B. Bigot a présenté une étude numérique de l'anisotropisation de la turbulence en présence d'un champs magnétique à grande échelle B_0 . Au début de la simulation, de l'énergie est injectée de façon isotrope aux grandes échelles; au fur et à mesure que la turbulence décline, on observe une élongation des structures parallèlement à B_0 et la formation de petites échelles uniquement dans les directions perpendiculaire à B_0 .

Franck Plunian — LEGI, Grenoble

F. Plunian a introduit un nouveau modèle en couche de la turbulence MHD qui prend en compte la possibilité d'interactions non locales entre nombres d'onde. Ce modèle a été appliqué à l'étude des spectres et des transferts d'énergie pour différentes valeurs du nombre de Prandtl magnétique. L'influence des interactions non locales est plus importante pour $P_m \gg 1$.

Germain Rousseaux — Université de Nice-Sophia Antipolis

G. Rousseaux nous a proposé une dérivation des équations de la MHD à partir des équations de propagation des potentiels (formulation de Riemann-Lorenz). Cette approche permet de retrouver les deux limites galiléennes de l'électromagnétisme — électrique et magnétique — et de démontrer que la condition de Jauge de Coulomb correspond à la limite magnétique de celle de Lorenz.

Références: Rousseaux (*Europhys. Lett.*, 2005); de Montigny & Rousseaux (*Eur. J. Phys.*, 2006).

Sacha Brun — CEA, Saclay

S. Brun a présenté les résultats de simulations MHD anélastiques de la zone radiative et de la tachocline solaire. Il a étudié le développement et la saturation d'instabilités non-axisymétriques du champs magnétique ($m \sim 40$ pour B_{pol} , $m \sim 1$ pour B_{tor}) ainsi que l'influence de la rotation et du cisaillement à grande échelle sur celles-ci. Pour B_{pol} , l'instabilité se présente à plus haut m en présence de rotation; sans rotation, elle se développe dans l'ensemble du domaine sphérique. L'effet du cisaillement est de concentrer l'instabilité de B_{tor} près des pôles. Contrairement aux idées avancées par Spruit, aucun effet dynamo n'a été observé dans la zone radiative.

Références: Brun & Zahn (*A&A*, 2006).

Mariana Huerta — LEGI, Grenoble

L'étude de l'évolution temporelle d'un mode de Fourier de la vorticité dans une expérience de turbulence dans un jet d'air permet d'identifier une dynamique "rapide", dependante de l'échelle ($\tau_c(k) \sim 1/(k U_L)$, en accord avec l'effet de sweeping) et une dynamique "lente", indépendante de k (Chevillard *et al.*). Des simulations numériques utilisant les modèles GOY et SABRA permettent de retrouver ces deux dynamiques mais sans effet de sweeping pour la dynamique "rapide" ($\tau_c(k) \sim \epsilon^{1/3} k^{-2/3}$) qui n'est pas reproduit par de tels modèles en couche. On observe aussi des corrélations temporelles non négligeables entre différents modes, en accord avec une cascade directe d'énergie. La dynamique "lente" serait due à quelque chose qui se produit au niveau de l'injection d'énergie et qui est ressenti à toutes les échelles, au cours de la cascade.

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

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

THEME 6 « TRANSPORT TURBULENT »

Méthodes lagrangiennes en théorie du transport turbulent

Dario Vincenzi

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

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

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

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

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

Christos Vassilicos

Imperial College, Londres (Grande-Bretagne)

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

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

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

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

Aziz Hamdouni

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

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

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

Transport turbulent dans le Soleil

Nicolas Leprovost

University of Sheffield (Grande-Bretagne)

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

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

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

Convection à haut nombre de Rayleigh dans un canal vertical

Mathieu Gibert

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

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

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

Transport de champ magnétique par un écoulement turbulent de sodium liquide

Michael Berhanu

Laboratoire de Physique Statistique, Ecole Normale Supérieure, Paris

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

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

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

L'étude de la turbulence superfluide est l'objet de l'expérience TSF (Turbulence Superfluide en France). Cette turbulence est observée avec l'hélium à basse température ($T < 2.2$ K). La faible viscosité de l'hélium permet d'atteindre de très hauts nombres de Reynolds Re , mais en contrepartie, l'énergie cinétique du fluide se propage plus loin vers les petites échelles avant d'être dissipée. Ainsi, dans un écoulement à $Re = 10^7$, l'échelle de dissipation visqueuse est de l'ordre du micromètre. Ceci implique alors la réalisation de capteurs submicroniques pour accéder aux informations aux petites échelles. De plus, afin d'obtenir une bonne résolution en taille et en fréquence des petites échelles tourbillonnaires, la fréquence caractéristique de mesure dépasse le mégahertz. Différents types de mesures sont appliquées à la mesure de la turbulence superfluide : des mesures de fluctuations de pression, de diffusion acoustique et d'atténuation d'onde de second son. Cette dernière mesure s'appuie sur l'atténuation des ondes thermiques lors de leur passage à travers l'écoulement d'hélium superfluide. Celle-ci est alors reliée à la densité de lignes de vortex. Un spectre de puissance de la densité de lignes de vortex en $-5/3$ a été obtenu, alors qu'une loi d'échelle en $+1/3$ était attendue.

L'expérience DTS (Derviche Tourneur Sodium) consiste en un écoulement de Couette sphérique. Les oscillations entre différentes branches observées sur toutes les mesures, alors que la vitesse différentielle est maintenue constante, sont attribuées à des variations de couplage électrique et de mouillage entre le sodium et le cuivre de la sphère interne. La différence de potentiel (ddp) le long d'un méridien est un bon équivalent de la vitesse azimutale du fluide, et donc l'évolution des mesures avec la ddp plutôt qu'avec la vitesse différentielle permet de s'affranchir de ces oscillations. Ainsi pour le champ magnétique induit, un phénomène surprenant a été mis en évidence par cette mise à l'échelle. En effet, de fortes valeurs (c'est-à-dire une forte circulation méridionale) sont mesurées sur un très faible intervalle autour de $Ro_{eff} = -1$. D'autre part, des ondes rétrogrades (ondes d'Alfvén?) et progrades (ondes de Rossby?) ont été identifiées grâce aux signaux de ddp le long d'un parallèle.

Dans l'expérience VKS (Von Kármán Sodium), l'effet dynamo a été observé. Ceci est une réelle avancée car l'écoulement n'est ici pas contraint (contrairement aux expériences de Riga et de Karlsruhe). Ceci a été possible grâce à plusieurs modifications : l'ajout d'une chemise en cuivre pour avoir du sodium au repos autour de l'écoulement, un anneau dans le plan méridien afin de réduire les fluctuations grande échelle dans la couche de mélange, des disques en fer pur pour isoler magnétiquement le sodium derrière les disques. La mesure des trois composantes du champ magnétique dans le plan méridien montre une amplification de la composante azimutale (jusqu'à 35 Gauss) lors d'une augmentation de la fréquence de rotation des disques (de 10 à 22 Hz). Le seuil dynamo se situe à un nombre de Reynolds magnétique $Rm = 32$. La puissance requise pour avoir l'effet dynamo est de l'ordre de 20% en plus de la puissance nécessaire à la génération de l'écoulement. Lorsque les fréquences de rotation des disques sont différentes, des comportements divers sont observés : des phénomènes périodiques, des inversions ou des excursions du champ magnétique. Une décroissance de 20% de la puissance est mesurée lors des inversions. La fréquence des inversions augmente avec la température.

GDR Turbulence & Dynamo

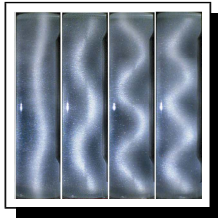
Nice, 6-9 nov. 2006

Compte rendu du thème 8 "Divers"¹

17 novembre 2006

Michaël Le Bars : *effet de la force de Coriolis sur l'instabilité elliptique*

(IRPHE, Marseille)



Une instabilité elliptique est caractérisée par la déstabilisation 3D d'un écoulement 2D tournant (voir Kerswell 2002 pour une revue). On peut l'observer dans le sillage d'un avion par exemple. Les travaux présentés ici font suite à la thèse de Laurent Lacaze (IRPHE, Marseille) sur le comportement d'un tourbillon dans une sphère déformée (spin-over). Il s'agit d'étudier l'effet de la rotation, et donc la force de Coriolis en particulier, sur l'instabilité observée. Il s'agit d'un travail expérimental appuyé par une étude théorique des modes résonants principaux de l'écoulement.

On peut prédire théoriquement que la force de Coriolis modifie les fréquence de résonance d'un facteur $\frac{2\Omega^G}{(1+\Omega^G)}$ ou Ω^G est la rotation globale (en pratique le dispositif est installé sur une table tournante). On peut aussi donner une expression explicite du taux de croissance de l'instabilité.

Des mesures sur une instabilité elliptique dans un cylindre ont d'abord été présentées. On observe des odes de résonances plus ou moins complexes. En mesurant l'amplitude de la forme sinusoïdale du tourbillon on accède au taux de croissance de l'instabilité. Les mesures sont en bon accord qualitatif avec les résultats théoriques. L'expérience reste limitée par les vitesses de rotation accessibles sur la table tournante.

Des résultats similaires ont été présentés pour l'instabilité dans un écoulement sphérique déformé. On peut finalement sélectionner un mode de résonance particulier en jouant sur le rapport $\frac{\Omega^{Fluide}}{\Omega^{Global}}$.

Péter Horvai : *transport de particules, exposant de Lyapunov de la séparation de particules inertielles*

(travail avec Gawedzki, Fouxon)

Il s'agit de calculer les exposants de Lyapunov associés à la séparation de particules inertielles dans un espace à 2 dimensions, dans l'hypothèse d'un champ de vitesse Gaussien δ corrélé. Si $\vec{R} = (x, y)$ est le vecteur séparation

¹rédigé par Pierre Chainais, pchainai@isima.fr

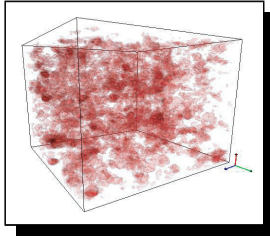
entre les 2 particules considérées, on pose $z = V/R + 1/(2\tau)$ où V et R sont des nombres complexes (par exemple $V = u + iw$ et $z = (u + iw)/(x + iy) + 1/(2\tau)$) et τ est le temps de Stokes. Alors, on montre que :

$$\frac{dz}{dt} = -z^2 - \frac{1}{4\tau^2} + U.$$

où U est un mouvement Brownien sur le plan complexe avec des coefficients de diffusion β_L et β_N dans les sens réel et imaginaire respectivement. L'étude théorique de ce système mène à des expressions explicites de l'exposant de Lyapunov recherché. Quand l'un des coefficients de diffusion vaut 0 on peut trouver une solution analytique (et Lyapunov $= \langle z \rangle - 1/(2\tau)$), sinon on obtient seulement le comportement asymptotique pour τ grand (en plus de la valeur $\tau = 0$ bien sûr).

Pierre Chainais : *utilisation de processus stochastiques dans les simulations numériques ?*

(LIMOS UMR CNRS 6158, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand)



La modélisation statistique des écoulements turbulents est souvent limitée à l'identification de propriétés statistiques (moments, distributions, fluctuations...) à partir de données expérimentales ou numériques. On identifie alors implicitement les données à une réalisation d'un processus stochastique. La définition de processus stochastiques ayant de "bonnes propriétés" (spectre en $k^{-5/3}$, évolution des PDF à travers les échelles...) est un problème délicat, à l'interface entre modélisation physique et mathématique. Le travail présenté ici fait état de processus stochastiques, les *cascades infiniment divisibles*, permettant d'obtenir un champ scalaire positif, pouvant par exemple être assimilé au champ de dissipation turbulent $\varepsilon(\mathbf{x}, t)$. On peut ainsi simuler un champ scalaire 3D évoluant dans le temps. Aussi bien la répartition spatiale (dépendance en $\mathbf{x}$) que l'évolution temporelle (dépendance en t) de ce champ sont multifractales. Le processus obtenu est intermittent en temps et en espace. Ses propriétés (inhomogénéité, anisotropie, distributions...) sont facilement contrôlables pour obtenir une grande variété de processus. La prochaine étape sera l'obtention de processus vectoriels. La question se pose de savoir si ce type de processus possède suffisamment de bonnes propriétés pour être utilisés pour simuler les petites échelles d'un écoulement, les grandes échelles étant simulées en utilisant les équations de Navier-Stokes.

Un petit film est disponible à

<http://www.isima.fr/chainais/PUB/FILMS/exempleToulouse.avi>

Ce petit film montre une succession d'images multifractales, dont l'évolution

temporelle est elle-même multifractale.

Références : Multidimensional infinitely divisible cascades. Application to the modelling of intermittency in turbulence, P. Chainais, *European Physical Journal B*, Vol. 51, no. 2, pp. 229-243, 2006.

Daniel Schertzer : *stratification, ondes, turbulence, analyses, simulations pour des écoulements géophysiques*

(CEREVE, ENPC, Paris ; travail avec S. Lovejoy, A.F. Tuck, S.J. Hovde, L. Tramini, G. Blanchet, A. Oguic)

Après le rappel de quelques analyses fondamentales (spectre de Van Der Hoven, diagramme de Stommel,...), les résultats de plusieurs observations expérimentales dans les écoulements atmosphériques utilisant un LIDAR embarqué dans un avion (Pacific 2001) sont présentés. Ces résultats illustrent notamment la stratification atmosphérique. La notion de sphéro-échelle est évoquée (Lilley et al. PRE 2004). Ensuite, les résultats de mesures par des sondes (campagne de 2004) permettent de mettre en évidence une stratification fractale des couches stables et instables de l'atmosphère, avec une structure proche de celle d'un ensemble de Cantor de dimension fractale $D_c = 0.89$. On peut aussi montrer que les contraintes de cisaillements dans une couche sont reliées à son épaisseur par une loi de puissance en $3/5$ cohérente avec un modèle de Bolgiano-Obukhov. Les observations sont similaires pour le moment d'ordre 1 en valeur absolue des accroissements de température et de concentration en ozone. Enfin, des illustrations de nuages synthétisées par intégration fractionnaire d'un champ scalaire (FIF pour Fractional Integration of a localized Flux) sont présentées.

Emmanuel Lévêque : *simulation des grandes échelles et turbulence cisailée*

(Laboratoire de Physique ENS Lyon, travail avec F. Toschi, L. Shao, J.-P. Bertoglio)

Emmanuel Lévêque a présenté un modèle sous-maille pour LES obtenu en modifiant le modèle de Smagorinsky. Un modèle sous-maille décrit le tenseur :

$$\tau_{ij}(\vec{x}, t) = \langle u_i(\vec{x}, t) u_j(\vec{x}, t) \rangle - \langle u_i(\vec{x}, t) \rangle \langle u_j(\vec{x}, t) \rangle$$

qui apparaît dans les équations de Navier-Stokes lorsqu'on décompose le champ de vitesse en "grandes échelles + fluctuations". On propose alors un modèle de viscosité turbulente qui doit pomper aux grandes échelles la bonne quantité d'énergie. Le modèle de Smagorinsky présente quelques défauts, notamment au voisinage des parois. On peut alors modifier le modèle de différentes manières. On peut utiliser une fonction qui s'annule à la paroi,

mais il n'est pas évident d'en ajuster l'épaisseur. On peut aussi proposer un modèle dynamique, mais il risque de s'avérer numériquement instable et très coûteux en temps de calcul. On peut proposer un compromis :

$$\nu_T(\mathbf{x}, t) = (C_s \Delta)^2 (|\bar{S}(\mathbf{x}, t)| - |\langle \bar{S}(\mathbf{x}, t) \rangle|)$$

où $\bar{S}$ est le taux de cisaillement. Le modèle proposé respecte notamment le cas limite laminaire puisqu'alors $\nu_T = 0$. Le modèle a été validé sur un écoulement dans un canal plan par comparaison avec les résultats d'une DNS : le comportement près des parois semble bon. Une simulation d'un écoulement derrière une marche d'escalier présente elle aussi un bon comportement.

J.-P. Laval a demandé s'il était intéressant de raffiner le modèle de Smagorinsky puisque les hypothèses associées sont contestables. Emmanuel a répondu que ce modèle était intéressant puisque couramment utilisé dans l'industrie pour son rapport performance sur coût de calcul imbattable. Un autre problème concerne l'utilisation de moyennes d'ensemble dans le modèle d'Emmanuel : elles doivent effectivement être estimées pendant la simulation elle-même en utilisant une hypothèse d'ergodicité.

Référence : preprint disponible à

<http://perso.ens-lyon.fr/emmanuel.leveque>

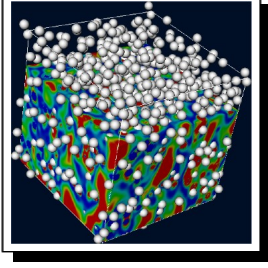
Bernard Malraison : *actuateurs électro-aérodynamiques et influence de la couche limite*

(Laboratoire d'Electrostatique et de Matériaux Diélectriques, travail avec Franck Mc Cuskey et F. Pirotais (LEGI))

Il s'agit d'étudier l'interaction éventuelle entre un flux de charges et un écoulement fluide grâce à l'utilisation d'un système essentiellement constitué d'une électrode et d'un circuit imprimé associé. Les chocs entre un flux de charges issues de l'électrode (électro-germes) et les molécules du fluide peuvent engendrer une avalanche électronique par ionisation du gaz par exemple. Il apparaît alors un vent électrique, susceptible de modifier le comportement de la couche limite (au-dessus du circuit imprimé). On pourrait imaginer retarder ainsi le décollement d'une couche limite. Cependant, les ordres de grandeurs sont incompatibles avec une application pratique aux voitures ou aux avions.

Aurore Naso : *l'algorithme Physalis : un outil pour la simulation de particules en écoulement turbulent*

(Post-Doc à l'Université de Twente aux Pays-Bas, en collaboration avec Andrea Properetti)



En suspension diluée, le rôle des particules dans un écoulement est pratiquement négligeable. Lorsque la densité en particules augmente, on observe une interaction entre les particules et l'écoulement. Lorsque cette densité devient importante, on observe de plus l'effet des chocs entre particules. L'algorithme Physalis (Properetti et al. 2003) a pour objectif de simuler la dynamique de sphères 3D ou de cylindres 2D dans un écoulement gouverné par les équations de Navier-Stokes. L'objectif du travail présenté ici est la simulation d'un écoulement impliquant jusqu'à 1000 sphères de taille finie. Le principe de Physalis est le suivant : en utilisant la condition de non-glissement, on peut résoudre analytiquement l'écoulement au voisinage de la particule dans son référentiel de repos ($\psi = \sum_n A_n f_n(r, \theta) + B_n g_n(r, \theta)$). Le reste de l'écoulement est résolu numériquement. Ceci permet d'éviter la complexité géométrique introduite par la frontière de la particule (grille cartésienne). La condition de non-glissement est résolue exactement. Il n'y a pas de modélisation de forces (premiers principes). Le temps de calcul augmente très peu avec le nombre de particules considérées.

Romain Monchaux : *un théorème fluctuation-dissipation pour les écoulements turbulents axisymétriques*

(thèse dirigée par Bérangère Dubrulle, CEA Saclay)

On considère un écoulement turbulent comme un système hors équilibre ayant de nombreux degrés de liberté (cf. les travaux de Sommeria, Robert & Bouchet en 2D).

Romain a commencé par un rappel théorique des travaux de Le Provost, Dubrulle & Chavanis 2005 sur les fluctuations du moment cinétique dans un écoulement de Beltrami. On obtient de manière exacte que $\sigma \propto r^2$.

Les mesures par LDV et PIV dans un écoulement (eau-glycérol) axisymétrique de von Kármán-Couder (machine à laver) montrent que le moment cinétique devient quasi-proportionnel à la fonction courant ψ lorsque le nombre de Reynolds augmente, ce qui indique un comportement similaire aux hypothèses d'un écoulement de Beltrami. De plus, on observe que :

$$\bar{\sigma}^2 - \bar{\sigma}^2 = \frac{r^2}{\beta},$$

où β s'interprète alors comme l'inverse d'une température dépendant de Re . Les travaux futurs devront faire le lien avec les fluctuations d'autres quantités.

Yves Gagne a demandé si l'on pouvait considérer que l'écoulement se "Beltramise" lorsque Re augmente. Même si on observe effectivement des comportements similaires du moment cinétique à haut Reynolds, on ne peut cependant pas en déduire que la dynamique de l'écoulement est la même. Des dynamiques différentes peuvent donner lieu à des observations similaires sur certaines quantités.

Référence : Monchaux et al., PRL'2006.

Wouter Bos : *forçage périodique de la turbulence et réponse des petites échelles*

Postdoc LMSNM Marseille, collaboration avec J.-P. Bertoglio, L. Shao (Ecole Centrale de Lyon) et R. Rubinstein (NASA Langley)

La réponse des petites échelles à un forçage aux grandes échelles est étudiée en utilisant une fermeture en deux points (EDQNM) dans le cas de la turbulence isotrope. Dans l'équation pour l'énergie cinétique k ,

$$\dot{k}(t) = P(t) - \epsilon(t) \quad (1)$$

nous appliquons un forçage $P(t) = \bar{P} + \tilde{P} \cos(\omega t)$ avec $\tilde{P} \ll \bar{P}$ et nous évaluons la réponse de la dissipation $\epsilon(t) = \bar{\epsilon} + \tilde{\epsilon} \cos(\omega t + \phi_\epsilon)$. Sur la figure 1, nous montrons la partie périodique de la dissipation $\tilde{\epsilon}$ en fonction de la fréquence (ω). Nous montrons que la décroissance de $\tilde{\epsilon}(\omega)$ proportionnelle en ω^{-3} peut être expliquée par des interactions triadiques très non-locales.

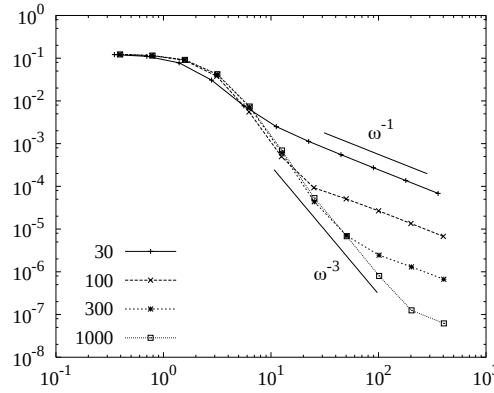


FIG. 1 – Fig. 1. $\tilde{\epsilon}(\omega)$ pour $30 < R_\lambda < 1000$

Référence : W. Bos, T. Clark and R. Rubinstein, Small scale response and modeling of periodically forced turbulence. Soumis à Phys. Fluids.

Laurette TUCKERMAN : *Patterns of turbulence*

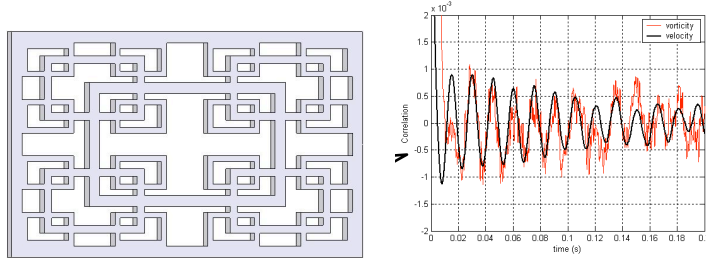
(LIMSI/Warwick)

On s'intéresse à la simulation numérique d'écoulements de Couette plan sur un domaine à grand rapport d'aspect. On observe l'apparition de motifs périodiques (animation issue de la simulation) similaires à ceux observés expérimentalement. Lorsque Re diminue, on observe une transition en passant par une intermittence on-off. En utilisant un modèle $K - \Omega$, on peut étudier l'instabilité et son taux de croissance en fonction de Re . On obtient un Reynolds critique différent dans les simulations et dans les expériences. La question se pose de savoir si on n'observe pas plus l'instabilité du code que de l'écoulement dans ce cas précis.

Nicolas Mazellier : *turbulence induite par une grille fractale*

(thèse avec Ch. Baudet, LEGI Grenoble, et Ch. Vassilicos, Imperial College de Londres)

Une motivation pour l'utilisation des grilles fractales est l'obtention d'un meilleur mélange. C'est une grille de maille carrée qui a été utilisée ici : La géométrie est contrôlée par 5 paramètres, qui permettent en particu-



lier les comparaisons avec une grille régulière (cf. Hurst et al., soumis à Phys. of Fluids). A vitesse moyenne identique, on obtient loin de la grille un écoulement de R_λ plus élevé (mesures fil chaud) indiquant un mélange plus intense. En utilisant des mesures d'interférométrie acoustique (Poulain et al. 2004) on peut étudier la fonction d'autocorrélation du champ de vorticité pour un nombre d'onde fixé. Près de la grille, on observe des fonctions d'autocorrélation oscillant sur une échelle de 10 cm environ de manière similaire pour le champ de vitesse $\vec{v}(\vec{x}, t)$ (fil chaud) et pour la vorticité $\omega(\vec{k}, t)$ (acoustique). L'origine de ces oscillations n'est pas bien comprise actuellement.

GDR 2865 : « Structure de la turbulence et Mélange »

2 Février 2007

ESCPI, Paris

Réunion conjointe avec le GDR Milieux Divisés

Organisateurs locaux: Bruno Andréotti et Philippe Petitjeans

Thèmes abordés :

- Transport de particules par un écoulement

Animateur: Bruno Andréotti

Compte-rendu par Bruno Andréotti

Réunion commune des GDR Turbulence et GDR Milieux Divisés Paris, 2 Février 2007

La réunion du 2 Février 2007 a porté sur le transport de particules par un écoulement et a réuni deux GDR ; le GDR Turbulence et le GDR Milieux Divisés. Ce sont quatre ou cinq communautés qui ont en réalité été touchées :

- du point de vue de la recherche fondamentale sur la turbulence, les questions du scalaire passif et des mesures lagrangiennes ont été au cœur des développements récents. Très naturellement, le cas des particules inertielles, qui ne suivent pas l'écoulement, se trouve maintenant au centre des questionnements.
- du point de vue de la recherche fondamentale sur les milieux granulaires, les travaux récents ont porté sur la compréhension du comportement mécanique des milieux granulaires secs (transition de blocage, rhéologie, lien avec la physique statistique hors d'équilibre). Bien qu'il y ait déjà eu quantité de travaux sur les suspensions visqueuses, le problème des milieux granulaires humides est pleinement d'actualité.
- le transport de particules joue un rôle important dans les processus de surface en Géophysique (rivières, dunes, etc...). C'est une motivation importante pour comprendre les modes de transport non-suspendus.
- de nombreux problèmes de Recherche et Développement passent par la résolution de problèmes liés à l'érosion et au transport (dragage des voies navigables, des ports situés dans des estuaires, des barrages hydroélectriques, érosion des barrages, pipe-lines pétroliers, formulation médicamenteuse en spray, etc)

La réunion a été conçue selon une formule thématique : les orateurs étaient invités à présenter des résultats, récents ou pas, en s'inscrivant dans un plan conçu par avance pour couvrir le domaine. Certains résultats sur les lits fluidisés et les suspensions ont ainsi repris une certaine actualité. L'idée a été de faire le point sur le sujet, en partant (presque) de zéro. Nous avons suivi le découpage suivant :

1) Forces d'un écoulement sur un grain du laminaire au turbulent.

Si les forces sur une sphère en régime de Stokes sont maintenant bien connues, il n'en va pas de même lorsque la sphère est plongée dans un écoulement turbulent. Les développements récents consistent à simuler directement l'écoulement autour de sphères et à mettre en place des mesures extrêmement fines par instrumentation de particules (point 2).

Intervenant : Hammouti Abdelkader, LMSGC.

2) Techniques de simulation et de suivi lagrangien

Dans le contexte industriel, l'effort a porté récemment sur les techniques de simulation numériques de transport, et beaucoup moins sur l'expérimentation. Nous avons longuement fait le point sur ces techniques.

Intervenants : DENES, Timea, LEPTAB, Pham Van Bang Damien, SPH, VIOLEAU Damien, SPH, VINKOVIC Ivana, LMFA, TRAORE Philippe Laboratoire: LEA, Simonin Olivier, IMFT.

3) Mesures lagrangiennes (expériences)

L'équipe de l'ENS Lyon a présenté ses résultats sur les mesures lagrangiennes par LDV étendue et ses développements de particules lagrangiennes instrumentées, faisant appel aux techniques MEMS

Intervenants : VOLK Romain, GASTEUIL Yoann

4) Influence de l'inertie : clustering de particules denses

En première approximation, les particules sont soumises au même gradient de pression que le fluide. Si elles sont plus denses que le fluide, elles se font donc éjecter des zones en rotation, créant ainsi des

concentrations préférentielles de particules. L'augmentation du taux de rencontre est importante dans certains phénomènes naturels : la pluie, le plancton, etc. Le clustering de particules denses fait l'objet de nombreux travaux contemporains, dans la filiation des études sur l'intermittence des années 90.

Intervenants : Guazzelli Elisabeth (IUSTI), Schmitt François (ELICO), Bec, Jérémie, (Cassiopée, Observatoire de la Côte d'Azur), Fede Pascal (IMFT), Jérôme Fortin, (LTI EA 3899), Praud Olivier, IMFT

5) Influence de la forme et de la taille des grains (ségrégation)

Ce sujet a suscité quelques commentaires, mais peu d'études existent.

Intervenant Pradel Francis (IFP)

6) Influence de la rétroaction des particules sur l'écoulement

Ignorée des numériciens et des études de turbulence 'fondamentale' la prise en compte des forces exercées par les particules sur le fluide est essentielle dans le cas du transport sur un lit sableux (charge de fond, saltation, etc). Nous avons succinctement fait le point sur cette question.

Intervenant Bruno ANDREOTTI (PMMH)

7) Influence de la cohésion

Quelques interventions ont eu lieu sur des situations où d'autres forces que les forces hydrodynamiques jouent un rôle de premier ordre (les boues par exemple).

Intervenant Kouame KOUAKOU (DYNECO-PHYSED), MALRAISON Bernard (G2Elab)

8) Suspension visqueuse, stokeslet et transport pneumatique

Du fait, entre autres, des applications pétrolières, la migration des particules en suspension visqueuse est un sujet étudié en permanence depuis plusieurs décennies. Il s'agissait donc de faire le point, d'une part, sur ce qui est connu, et d'autre part de découvrir les travaux récents sur le sujet :

LHUIILLIER Daniel (LMM), OGER Luc (Rennes), Lindner, Anke (PMMH, Deboeuf Angélique (FAST), Chevalier Christophe, PMMH, Chehata Gomez Daniel, IUSTI

9) Suspension turbulente (modèles réduits, vents de sable, aérosols, etc)

Simoëns Serge, LMFA, BARDIN MONNIER Nathalie, Allery Cyrille, LEPTAB (La Rochelle).

10) Transport de fond (érosion-saltation-reptation-bed load)

La compréhension et l'étude quantitative du transport de particules juste au dessus d'un lit sableux se sont beaucoup développées au sein des laboratoires du GDR MiDi. Faute de temps, nous avons fait un point rapide sur ces travaux récents.

Le Louvetel - Poilly Julie, Lachouette Damien CEMAGREF, Kouame KOUAKOU, P. Claudin; PMMH, Ouriemi Malika: (IUSTI), Valance Alexandre, GMCM, (Rennes 1), Mathieu Creyssels GMCM, (Rennes 1), BROSSARD Denis: (CEMAGREF Grenoble)

11) Problèmes de transport de particules en géophysique (transport, dépôts sédimentaires, etc)

Faute de temps, nous n'avons pas pu aborder cette partie importante concernant la partie géologique.

Intervenants malheureux: Lebunetel-Levaslot Julie (Le Havre), Simon Lopez Laboratoire: IFP, Alfredo Taboada (Montpellier), BOUCHETTE Frédéric (Montpellier), Fabien Graveleau (Montpellier), Narteau Clement, IPGP.

GDR 2865 : « Structure de la turbulence et Mélange »

21 - 23 Mai 2007

IRPHE, Marseille

Réunion conjointe avec le GDR Dycoec

Organisateurs locaux: Patrice Le Gal et Fabien Anselmet

Thèmes abordés :

- Grandes échelles et turbulence, simulation numérique.

Animateur: M. Abib

- Grandes échelles et turbulence, PIV et Méthodes Optiques.

Animateur: Fabien Anselmet

- Perturbations optimales et contrôle.

Animateur: Uwe Ehrenstein

- Régimes transitionnels.

Animateur: Patrice Le Gal

Compte-rendu par Patrice Le Gal

GDRs

TURBULENCE & DYCOEC

IRPHE, Marseille
21- 22 - 23 Mai 2007

Synthèse des journées par P. Le Gal

Le but des ces trois journées était de réunir deux communautés appartenant aux deux GDR « Turbulence » et « Dycoec » : les spécialistes de la turbulence des fluides et ceux des instabilités et des systèmes dynamiques. La rencontre a été organisée autour de trois grands thèmes : les grandes échelles et la turbulence (thème se partageant lui-même en deux demi-journées concernant les aspects numériques et les aspects expérimentaux), les perturbations et le contrôle et finalement les régimes transitionnels. Chacun de ces thèmes ou sous-thèmes a été introduit par quatre conférenciers de renom qui ont présenté l'état des connaissances des différents domaines mais qui ont également commenté leurs résultats les plus récents. Suite à ces conférences introductives, des présentations orales d'une vingtaine de minutes ont permis de faire un tour d'horizon des recherches menées essentiellement en France sur ces thématiques. 28 présentations ont été faites, suivies par de nombreuses discussions et également une visite des bancs expérimentaux et souffleries de l'IRPHE.

Grandes échelles et turbulence : simulation numérique.

Le premier thème, introduit par M. Farge, concernait les grandes échelles et la turbulence. M. Farge a tout d'abord fait un rappel sur les notions de séparation d'échelles, les définitions de structures cohérentes et le lien entre les visions dans l'espace physique et dans l'espace spectral. M. Farge a ensuite présenté les techniques à base d'ondelettes utilisées pour opérer la délicate séparation entre structures cohérentes et bruit gaussien de la turbulence. L'aspect du traitement numérique des volumes importants de données a finalement été abordé, que ces données proviennent des simulations numériques ou des mesures PIV d'ailleurs. Un workshop sera organisé sur ce thème très prochainement.

A. Noullez enchaînait alors par une présentation de certains aspects analytiques liés au déclin de la turbulence et de l'énergie contenue aux grandes échelles. Des lois de décroissance en puissance du temps sont obtenues et comparées à des résultats expérimentaux et numériques. W. Bos a ensuite présenté des simulations numériques de la dissipation normalisée dans le cas de turbulence forcée et de turbulence en déclin [W. J. T. Bos et al., Phys. Fluids 19, 045101 (2007)]. On observe une grande différence pour les deux types de turbulence, différence qui peut être expliquée par l'influence du temps non-linéaire de cascade introduisant un déséquilibre spectral pour la turbulence statistiquement non stationnaire. L'analyse

phénoménologique reproduit d'une manière satisfaisante les résultats numériques. M. Marquillie a quant à lui, présenté une simulation numérique d'un écoulement de canal turbulent avec gradient de pression. Le gradient de pression est généré par une bosse montée sur la plaque plane inférieure et est pris en compte numériquement à l'aide d'un changement de variable. L'écoulement turbulent présente une zone d'écoulement de retour très fine sur la paroi courbe qui est caractérisée par une succession de tourbillons très intenses proche de la paroi. S. Poncet a discuté les résultats d'une LES comparés à des mesures de vitesse par LDV à deux composantes dans le cadre d'écoulements turbulents en cavité rotor-stator fermée. L'approche LES est basée sur une méthode de stabilisation dite méthode de Viscosité Spectrale Evanescence [Séverac & Serre, J. Comp. Phys., 2007] qui permet de conserver la convergence spectrale d'une DNS. Les approches numérique et expérimentale sont en bon accord pour la gamme de nombre de Reynolds $10^5 \leq Re \leq 10^6$ considérée et pour une cavité de grand rapport d'aspect $G=5$. La nature 3D turbulente des deux couches limites a été montrée. Le critère Q a permis de plus de mettre en évidence numériquement les structures turbulentes présentes dans ces couches limites [Séverac et al., Phys. Fluids, 2007]. F. Plaza a ensuite abordé le manque de généricité de l'injection d'un scalaire, que ce soit dans une couche de mélange (dans le cas d'un approvisionnement en scalaire par un écoulement secondaire) ou dans une couche limite turbulente, dans le cas par exemple d'une paroi chauffée. Grâce à des expériences utilisant un film de platine (100 nm), évaporé sur un substrat céramique comprenant deux électrodes, il caractérise l'efficacité du refroidissement d'un écoulement turbulent incident sur une paroi chaude. C. Cambon a clos cette session par la présentation de l'analyse statistique de la turbulence fortement anisotrope et la relation qui existe entre les petites et les grandes échelles en particulier pour les cas d'écoulements en rotation. La turbulence d'ondes inertielles avec stratification a été esquissée avec en particulier le rôle des effets non linéaires du mélange de phase.

Grandes échelles et turbulence : PIV et méthode optique.

Après une introduction générale sur les progrès récents des techniques de mesure par PIV, la conférence de F. Scarano a abordé les développements d'un système de mesure 3D PIV basé sur l'illumination, l'enregistrement et la reconstruction des particules de traceur dans un volume d'observation tridimensionnel et ses applications aux écoulements fortement tridimensionnels [G.E Elsinga et al. Experiments in Fluids, 2006]. La technique est basée sur l'utilisation de plusieurs vues simultanées des traceurs lumineux et sur la reconstruction tridimensionnelle de ces traceurs vue comme une distribution d'intensité de lumière. La technique est donc désignée sous le nom de PIV tomographique ou Tomo-PIV. La reconstruction du champ tridimensionnel des particules est obtenue par application d'un algorithme itératif (MART) et analysée au moyen de corrélations croisées 3D avec une technique de déformation multi-résolution itérative de volume. L'application au sillage d'un cylindre circulaire a été présentée pour montrer le potentiel de la méthode en mesurant des champs de vitesse 3D résolue dans le temps.

F. Luysseran est ensuite revenu sur le problème du traitement du grand volume de la masse des données obtenues par mesure PIV ou par simulation numérique des écoulements. C'est le cas, notamment, lorsqu'on cherche à utiliser les champs de vitesse pour identifier un système dynamique réduit dans le but de contrôler le développement tourbillonnaire par exemple. La question se pose alors de ce que contiennent et révèlent, de la structure 3D de l'écoulement, les données de vitesse (à 2 ou 3 composantes) prélevées dans un plan. Les modes propres 2D, obtenus à partir des mesures PIV 2D et des coupes 2D du champ de vitesse numérique, sont alors comparés aux modes POD 3D calculés à partir du champ de vitesse 3D numérique.

L'exemple de l'écoulement dans une cavité ouverte prouve que les modes propres orthogonaux 2D (POD 2D) gardent alors une pertinence réelle. F. Moisy a ensuite discuté à partir des données de PIV 2D provenant d'une expérience de turbulence en rotation réalisée au FAST, la mesure de fonctions de structure et des spectres d'énergie [C. Morize et al., Phys. Fluids 17 (9), 095105 (2005); C. Morize and F. Moisy, Phys. Fluids 18, 065107 (2006)]. Des moyennes d'ensemble sur des réalisations indépendantes de turbulence en déclin dans le référentiel tournant sont analysées. Bien que le domaine dissipatif ne soit pas résolu, la qualité des mesures dans le domaine inertiel permet d'estimer les exposants de fonctions de structure jusqu'à l'ordre 8. Enfin, un indicateur de la "dimensionnalité" de la turbulence en rotation, construit sur les fonctions de structure longitudinales et transverse avec l'hypothèse d'isotropie (3D ou axisymétrique), est analysé. Après une description du logiciel de PIV utilisé à l'IRPHE, P. Meunier a présenté des mesures de champ de vitesse dans des sections d'un cylindre en précession. Elles font apparaître les résonances des modes de Kelvin pour les rapports de fréquence (de précession et de rotation) en accord avec la théorie linéaire. Une étude visqueuse et non-linéaire a été mise en place pour expliquer la saturation des résonances, en excellent accord avec les résultats expérimentaux. M. Marquillie a ensuite présenté les résultats du groupe expérimental du LML sur l'étude expérimentale d'une couche limite turbulente à grand nombre de Reynolds par anémométrie à fils chauds et PIV stéréoscopique. Cette expérience a été réalisée dans le cadre du contrat européen WALLTURB conjointement avec le LEA de Poitiers et l'Université de Chalmers (Suède). L'enregistrement simultané de 143 fils chauds et de deux systèmes avancés de PIV Stéréoscopique a été réalisé. Le premier système PIV est composé de six caméras et de deux lasers. Un plan perpendiculaire aux peignes de fils chauds (perpendiculaire à la paroi) situé 1 cm devant ce dernier et un plan parallèle à l'écoulement et perpendiculaire à la paroi situé en amont du précédent ont été enregistrés simultanément profitant de la polarisation différente des lasers. Le second système est réalisé à l'aide de deux caméras rapides et d'un laser fonctionnant à des fréquences supérieures à 1 kHz dans un plan parallèle à la paroi. Cette expérience devrait permettre d'améliorer la compréhension des écoulements turbulents à proximité de paroi. Les transports turbulents dans les jets ont été décrits par S. Tsikata qui examine le transport turbulent dans un jet axisymétrique avec diffusion collective. Il n'y a que très peu d'études sur les grandes échelles d'un tel système et on cherche à comprendre les déplacements des éléments du fluide effectués par les plus grandes structures. S. Tsikata montre que des déviations de normalité sont évidentes aux plus grandes échelles, en accord avec un transport exacerbé et que des fonctions du type Lévy sont appropriées pour décrire la fonction caractéristique des déplacements dans la zone inertielle de la turbulence. J. Léorat concluait cette matinée dédiée aux diagnostics optiques et leurs utilisations dans différents écoulements par la présentation de résultats sur la rotation différentielle d'un écoulement forcé par précession.

Perturbations optimales et contrôle :

C'est à A. Bottaro qu'était confiée la conférence introductive aux perturbations optimales et au contrôle des écoulements. S'appuyant sur le calcul de l'écoulement dans un canal de section carrée, qui est connu pour être toujours stable vis à vis de petites perturbations qui croissent exponentiellement (Tatsumi et Yoshimura, JFM 1990), les perturbations optimales sont calculées avec une technique issue de la théorie du contrôle optimal, en itérant l'opérateur direct et son adjoint. Ces perturbations ont la forme de tourbillons longitudinaux. Dans la section du canal, la solution avec 4 tourbillons (un vortex dans chaque quadrant) est capable d'extraire le maximum d'énergie de l'écoulement moyen, avant la décroissance modale prévue par l'analyse linéaire. Lorsque cette perturbation est employée comme condition initiale d'une

DNS, elle n'arrive pas à faire transitionner l'écoulement, même pour une amplitude initiale assez grande. Si des perturbations différentes, sous la forme d'ondes progressives, sont imposées à $t=0$, l'écoulement devient turbulent assez rapidement pour un nombre de Reynolds marginal d'environ 150. Dans les conditions marginales l'état qui émerge est un état "de bord" formé par 4 tourbillons, très robustes, dont la forme s'approche de celle de la perturbation optimale. L'état avec 4 tourbillons est un point selle dans l'espace de phase, et la trajectoire du système dynamique reste proche du point selle pour un temps long. La même ressemblance a récemment été remarquée aussi pour le cas de la conduite de section circulaire (Eckhardt et al., Annu. Rev. Fluid Mech. 2007); cette étude devrait permettre de ré-interpréter le concept de perturbation optimale. J. Hoepffner a, quant à lui, présenté l'étude de la stabilité d'un écoulement en identifiant toute perturbation qui peut croître en amplitude. Un code numérique a été écrit en utilisant un formalisme de matrices creuses qui permet de calculer les modes propres, les conditions initiales optimales et le forçage harmonique optimal pour des écoulements 2D. Lors de sa présentation, C. Cossu propose l'idée suivante qui paraît simple a priori : Les perturbations optimales, qui sont considérées comme les "plus dangereuses" du point de vue de l'évolution des transitoires amplifiés et de la transition dans les écoulements cisailés de paroi sont aussi les "plus efficaces" pour la manipulation des écoulements. L'exposé a résumé les activités de recherche récentes qui sont menées en étroite collaboration avec les collègues du KTH à Stockholm et qui montrent que cette approche est fructueuse pour manipuler efficacement la couche limite laminaire dans le but d'y retarder la transition à la turbulence [Cossu & Brandt, Phys. Fluids 2002 ; Fransson et al. Phys. Rev. Lett 2006] ; voir aussi <http://www.ladhyx.polytechnique.fr/people/carlo>). R. Bachelard a présenté une étude relative à la stabilisation d'une onde amplifiée par un faisceau de particules grâce à des ondes-test [R. Bachelard et al., Chaos 16, 023104 (2006) ; R. Bachelard et al., Eur. J. Phys. D 42, 125 (2007)]. L'intensité d'une onde électromagnétique en interaction auto-consistante avec un faisceau de particules chargées, comme dans un Laser Electron Libre par exemple, présente des oscillations importantes dues à un agrégat de particules, appelé macro-particule. Une stratégie est proposée pour stabiliser l'intensité en détruisant la macro-particule. Cette stratégie repose sur une analyse de la stabilité linéaire de quelques orbites périodiques déterminantes pour la dynamique, pour une modélisation champ moyen du système. La modulation d'un paramètre de contrôle fait apparaître dans le système des bifurcations qui provoquent des changements drastiques dans la dynamique auto-consistante, en particulier sur la macro-particule. Il est ainsi possible de stabiliser l'intensité de l'onde grâce à l'introduction d'une onde-test, qui joue le rôle de paramètre de contrôle. X. Leoncini a conclu cette première partie de session sur le contrôle par la présentation de résultats relatifs au mélange chaotique dans une rangée de tourbillons. G. Artama a ensuite montré les possibilités de contrôle du sillage d'un cylindre [D'Adamo J. Journal of Turbulence, 8:1, 1-22, (2007)] par un forçage stationnaire consistant soit en une rotation permanente du cylindre soit en un forçage électrodynamique imposé par des électrodes à la surface du cylindre. Un modèle dynamique empirique de type Galerkin a alors pu être construit à partir de clichés PIV et d'une méthode d'assimilation de données basée sur la POD. La fonction utilisée pour le contrôle est déduite d'un procédé de type Gram-Schmidt et un exemple de cette fonction de contrôle est obtenue dans un problème d'optimisation. Toujours sur les manipulations et le contrôle des écoulements, T. Duriez a alors présenté l'utilisation de générateurs de vortex pour le contrôle d'écoulements décollés et D. Barkley a présenté ses derniers résultats sur les perturbations optimales associées à l'écoulement derrière une marche descendante. Finalement, R. Chabreyrie montrait en fin de journée des résultats obtenus sur le mélange chaotique à l'intérieur d'une goutte en rotation oscillante.

Régimes transitionnels :

La dernière demi-journée de la rencontre était consacrée à la transition vers la turbulence. P. Manneville assurait l'introduction de ce thème en rappelant tout d'abord que l'étude de la transition vers la turbulence oppose en général le cas des écoulements fermés à celui des écoulements ouverts et, pour les premiers, le cas des systèmes confinés à celui des systèmes étendus. Pour les systèmes confinés, l'élimination adiabatique des modes stables permet une réduction dimensionnelle qui rend pertinente les notions de bifurcations, de scénarios et de chaos temporel et met la dynamique dans un cadre universel valide même assez loin du seuil de première instabilité. Pour les systèmes étendus, il faut raisonner en termes de modulations, d'enveloppes, de dynamique de phase /défauts, donc de chaos spatio-temporel, concept dont la validité universelle reste limitée à un voisinage plus restreint du seuil. Dans l'ensemble, on peut cependant dire que les choses sont assez bien comprises. Pour les écoulements ouverts la distinction première s'opère entre profils de base inflexionnels ou non. Les profils inflexionnels sont victimes d'instabilités inertielles de type Kelvin–Helmholtz qui débouchent sur une transition vers la turbulence globalement super- critique à Re plutôt bas. Au contraire, les profils sans point d'inflexion ne présentent pas d'instabilité à bas Re et sont éventuellement sujets à des instabilités (linéaires) visqueuses de type Tollmien–Schlichting à $Re = Re_{TS}$ élevé, de sorte que les écoulements correspondants ne sont que conditionnellement stables pour $Re < Re_{TS}$. L'advection de l'amont vers l'aval joue un rôle spécifique dont la conséquence mathématique est la distinction entre instabilités convectives trop faibles et emportées par le courant et instabilités absolues suffisamment fortes pour lui résister. Une conséquence physique plus pertinente pour notre sujet en est le mécanisme universel d'amplification des perturbations (lift-up) qui résulte de l'interaction entre écoulement moyen et fluctuation. Les perturbations en forme de tourbillons longitudinaux induisent en effet des traînées (streaks) et, dans le même temps, une boucle de rétroaction provoque l'amplification transitoire de l'énergie de perturbation, même dans les cas où l'écoulement est stable. Mathématiquement cette amplification est liée à la non-normalité de l'opérateur de stabilité linéaire, de plus en plus marquée quand Re augmente. De façon générale, la transition directe (by-pass) vers la turbulence provoquée par la croissance transitoire de l'énergie de perturbation peut donc être observée dans un écoulement laminaire linéairement stable sous l'effet de perturbations localisées d'amplitude finie qui évoluent pour former des poches turbulentes. Cette situation est observée dans l'écoulement de Couette plan linéairement stable pour tout Re , dans l'écoulement de Poiseuille dans un canal au delà de $Re \sim 1300$ alors qu'il est linéairement stable pour $Re < 5772$. Des poches turbulentes sont également observées dans les couches limites de Blasius en compétition avec le développement d'ondes de Tollmien–Schlichting si l'écoulement de base n'est pas assez propre. L'écoulement de Poiseuille dans un tube, lui aussi stable pour tout Re , subit également une transition directe par croissance de bouchons turbulents.

C. Nouar poursuivait le débat par la présentation de résultats du groupe du LEMTA concernant la transition d'un écoulement d'un fluide non-Newtonien dans une conduite cylindrique [J. Peixinho et al. *J. non-Newtonian Fluid Mech.* **128**, 172-184 (2005); M.P. Escudier et al., *J. non-Newtonian Fluid Mech.* **127**, 143-155 (2005)]. Il s'agit de la transition laminaire-turbulent pour un fluide non-Newtonien purement visqueux dans une conduite cylindrique. Le fluide utilisé dans les essais expérimentaux présente un caractère rhéofluidifiant suffisamment marqué pour induire une très forte stratification de la viscosité entre la zone pariétale et la zone centrale. Il a été constaté une asymétrie croissante du profil de vitesse axiale moyenne dans toute la phase de transition vers la turbulence. L'écoulement étant axisymétrique en laminaire et turbulent. Une étude expérimentale complète de cette

asymétrie a été faite et a révélé l'existence d'un état non linéaire stable caractérisé par deux rouleaux longitudinaux contra-rotatifs. La session se poursuivait par l'exposition des résultats de L. Tuckerman sur l'état intermédiaire entre la turbulence et l'état laminaire de l'écoulement de Couette plan dans un domaine de grandes dimensions latérales qui présente un motif de bandes obliques turbulentes et laminaires. L'écoulement moyen correspondant à ce motif est représenté presque parfaitement par une seule fonction trigonométrique le long du vecteur d'onde du motif. La composante de Fourier correspondant à la longueur d'onde du motif fournit donc un paramètre d'ordre pour cette transition. La distribution de probabilité de son amplitude présente un maximum à une valeur non-nulle lorsqu'un motif est présent et à zéro dans l'absence d'un motif. B. Viaud est ensuite revenu sur la couche limite au dessus d'un disque en rotation qui est le siège de plusieurs types d'instabilités, dont un mode absolu. Ce mode absolu intervient à un Reynolds de 507.3, peu avant la transition constatée expérimentalement vers 513. Dans cette perspective Pier (JFM2003) a conduit une analyse de stabilité secondaire en prenant comme état de base les rouleaux saturés solution de la relation de dispersion non-linéaire de l'écoulement laminaire supposé parallèle. Ces simulations numériques ont mis en évidence, en dehors de toute hypothèse, l'existence d'un mode global non-linéaire "éléphant" dont la structure et les caractéristiques quantitatives (taux de croissance et fréquence globale) sont en tous points semblables à celles du mode considéré par Pier comme état de base. Ceci dans le cas d'une cavité annulaire ouverte avec flux forcé. Après la pause, la conférence d'E. Wesfreid était centrée sur la stabilité du sillage d'un barreau cylindrique forcé par rotation oscillante autour de son axe. Le rôle du « mode zéro » formé par les interactions non linéaires quadratiques a été particulièrement illustré, en autres par les variations de l'extension longitudinale des tourbillons de recirculation derrière le cylindre. Y. Lebranchu présentait ensuite les résultats de sa thèse concernant l'étude expérimentale des ondes non linéaires générées dans un écoulement annulaire cisaillé tournant. C. Métivier, puis I. Mutabazi revenait sur les transitions dans les écoulements de fluide non Newtonien : la première sur les instabilités thermoconvectives pour des fluides viscoplastiques et la deuxième pour l'apparition de turbulence élastique dans un système de Couette-Taylor. Ce fût finalement A. Prigent qui conclut ces journées thématiques par la présentation de résultats récents sur la transition vers la turbulence dans un système de Couette-Taylor soumis à un gradient de température.

GDR 2865 : « Structure de la turbulence et Mélange »

13 - 25 Août 2007

Ecole d'été, Cargèse

Organisateurs: Luminita Danaila, Alain Noullez et Philippe Petitjeans

Thèmes abordés :

- **Small-scale turbulence: Theory, Phenomenology and Applications**

Compte-rendu par Luminita Danaila

SMALL-SCALE TURBULENCE: PHENOMENOLOGY, THEORY and APPLICATIONS

Summer school in Cargèse, France, 13 – 25 august 2007

SHORT OVERVIEW

Organizers : Luminita Danaila*, Alain Noullez** and Philippe Petitjeans***

*CORIA, Avenue de l'Université, BP12, 76801 Saint Etienne du Rouvray, France

**Observatoire de Nice, 06300 Nice, France

***ESPCI, 10 rue Vauquelin, 75231 Paris CEDEX 05, France

CONTEXT

Despite its large number of applications (climate, biological flows, chemical industry etc.), turbulence is still today, one of the less understood phenomena in physics. In the absence of an unifying theory, progress in understanding turbulent flows is primarily based on experimental measurements, numerical simulations and on our ability to interpret results using specific tools (wavelets, spectra etc.). Understanding turbulence is a major point for industrial and environmental applications: reducing noise and pollution, energy economy, optimisation of chemical reactors, better combustion efficiency etc.

Turbulent flows are known as containing a wide range of scales, each range of scales being characterized by different phenomena. For instance, the dissipation process is known as being a small-scale phenomenon. Therefore, in different industrial process, a role particularly important is played by the small scales. They are to be properly taken into account in the sub-grid scales (SGS) models. Another example deals with modelling micromixing (chemical industry, combustion), in which the small scales are the most important players.

In this context, one fundamental question was: are these small scales universal? If yes, under which conditions? If not, when? The non-universality of the small-scale behaviour, in tight connexion with the small—scale anisotropy, can be recasted and presumably explained.

OBJECTIVES

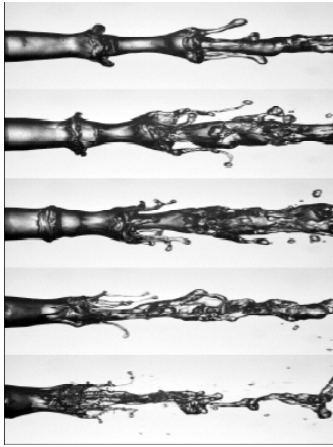
The essential aims of the summer school were double:

- Select important questions in turbulence. It is important these days to know which is the principal direction to be taken, and to answer the question ‘What should be done in turbulence?’.
- Have an insight on turbulence-related fields, for which Turbulence is important. We have chosen for this event the domain of Combustion. The phase of “mixing preparation” is particularly important for reactive flows (chemical industry, combustion etc). As an example, as far as combustion is concerned, a fine and precise characterization of the air/gaseous fuel mixing, in connexion with a better turbulent combustion, is recently of a particular importance (expensive fuels, pollution reduction, energy economy etc.). In this direction, it is important to better understand the micromixing properties, i.e. of the small-scale mixing, where the chemical reactions that constitute combustion take place. Number of questions concerning reactive flows remain without clear answer. As an example, the alignment of the mixing fraction gradient with the velocity gradient eigenvectors controls the evolution of the scalar dissipation and thus plays an important role in the non-premixed turbulent flames.

SUMMARY

Several aspects have been discussed, viz.

- Mixing of (liquid) fuel and air in engines: F.X. Demoulin
- Mixing in non-reactive and reactive flows: B. Renou
- Micro-mixing models for reactive flows: R. Fox. It was especially inferred that one important quantity for micromixing models is the mixing time, that strongly depends on the flow, the probability density function of the mixture fraction $Pdf(Z)$, the probability density function of the dissipation rate $Pdf(\epsilon)$
- Two-phase flows : E. Villermaux. Several laboratory experiments were presented, with an emphasis in particular phenomena such as: ligaments formation in liquid jets, droplets.



Formation of ligaments and droplets.



Liquid jets in a rocket engine (Snecma).

One of the conclusions in this lecture was that in this case (laboratory experiments, very near the injection nozzle), instabilities are able to predict most of the things, therefore turbulence is noise. Further downstream, turbulence does play a role.

The most important conclusion of this part is that: the Applied-Turbulence community uses a somewhat different language, but we do have important common questions.

As far as Turbulence by itself (i.e. fundamental research) is concerned, different lectures matched the three important steps in acceding the most important challenge in turbulence research: predicting complex turbulent flows. The three steps are:

- A) Analysis of different flows
- B) Modelling
- C) Prediction of Turbulence

We further briefly provide a succinct illustration of some ideas discussed for each topics:

Analysis and Modelling

The most common way to diagnose a flow is to perform measures.

Hot/cold wires measurements (principles and shortcomings) have been presented by R.A. Antonia, who inferred that small scales can be measured, provided (spectral) corrections are applied. Corrections are to be applied to both PIV (that only provide 20 % of the mean energy dissipation rate) and DNS (at low Reynolds numbers).

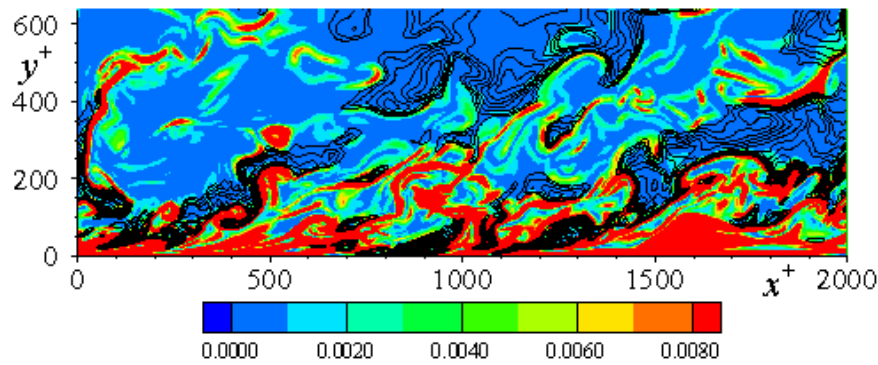
Laser-based measurements methods have been presented by B. Renou and C. Baudet (PIV, PLIF, PTV), who discussed the resolution and noise problems inherent to these techniques.

Cryogenic measurements were presented by C. Baudet, who insisted on the delicate problem of the calibration of probes at each temperature.

A) Phenomenology and Theory in different kinds of flows

Various flows have been the context in which theoretical aspects were analysed.

1. Homogeneous and Isotropic Turbulence: A. Pumir (and others), who presented the tetrads model for the velocity-gradient tensor which captures both scaling and local structureà reproduce some ‘universal’ properties of turbulent flows: ‘tear drop’ shape in the velocity gradients invariants (Q-R) plane.
2. Anisotropic Turbulence (stratification etc.): C. Cambon.
3. MHD flow: A. Pouquet, who presented anisotropic spectra that still present a Kolmogorov behaviour in $-5/3$ and $-3/2$ and also Structure Functions (which much less obey Kolmogorov predictions).
4. Channel flow: R.A. Antonia, who discussed the role played by the structures near the wall.



Lines are the instantaneous θ . (solid lines: positive θ ; dashed lines: negative θ).

5. Jet flow: C. Baudet, who adopted the Eulerian vs. Lagrangian turbulence.
6. 2D turbulence: A. Lanotte : no variation in z , but fluctuations eventually allowed two inertial regimes: enstrophy and energy; inverse cascade.
7. Scalar transport: M. Cencini (passive versus active); E. Villiermaux: passive scalar mixing, near-field region of a jet flow, probability density function of the scalar concentration.



Interaction between two liquid jets.

Essential questions that have been raised are:

1) Are the small scales universal? Y. Kaneda answers through DNS (4096^3). The answer is “Yes, ... but slow”.

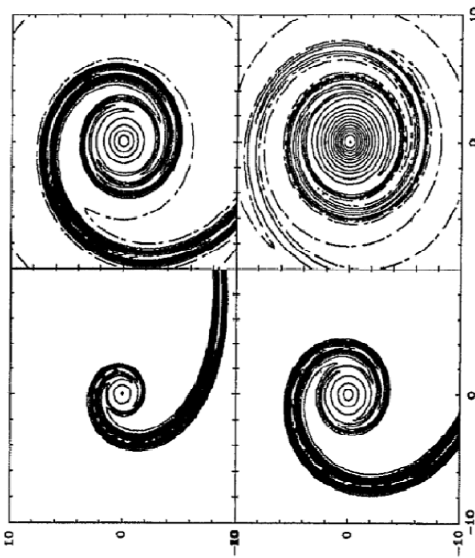
The further question “How slow?” is answered by R.A. Antonia:

That depends on what we look at: for instance, for decaying turbulence, a Reynolds number (based on the Taylor’s microscale) as high as 10^6 is needed before universality be eventually respected.

2) Is local isotropy valid ? Y. Kaneda addressed shear flows (MHD, stratified etc..), and the answer to the question is “NO, the anisotropy remains large, especially at moderate Reynolds numbers”.

B) Prediction of turbulence

Prediction of Turbulence had been discussed in the context of the LES (Large Eddy Simulations). General aspects of LES were presented by P. Comte, whereas SGS models with stretched spiral vortices have been addressed by D. Pullin.



Time evolution of a spiral vortex.

Finally, the participants of the summer schools debated in during two round tables, with the next (here, briefly presented) conclusions:

CONCLUSIONS

In conclusion, the participants discussed the general orientation of turbulence research, by emphasizing some classical questions and beyond. We remind some of them in the following:

1. Highly performant tools to analyse turbulence are nowadays available and/or being developed. These concern:
 - Computations: which are supposed that higher and higher Reynolds number be simulated. This intends understanding phenomena clearly present at high Reynolds, and also testing classical theories against data.
 - Technological tools for measurements: PIV, PTV, intelligent particles etc. are to be developed. Continuous technological progress allows for more and more reliable insight into real flows, which in turn allows that phenomenology and theory be more adapted to reality, which further gives raise to new questions, that needs to be answered using a better technology ... etc.
 - Modern mathematical tools: curvelets (space, scale and curvature) which revealed the fine structure of scalars (and enstrophy): blobs, tubes and sheets.
2. Local structure of turbulence is a question addressed wider and wider. This consists in detecting local coherent structures and explain statistics in terms of these.
3. Going from simple to more complex flows: near-wall, 2-phase flows, reactive, variable density, complex geometry ...
4. Mathematical description of turbulence should be better used and the links among the classical spectral space and the real space is to be clearly established, especially in the case of anisotropic turbulence, in Eulerian and Lagrangian frames.
5. Finite Reynolds numbers effects are to be widely addressed in many contexts.

At the end of the summer school, the audience expressed its complete satisfaction of the school, emphasizing the high scientific level and good pedagogical qualities of all the lectures.

Further information can be obtained at <http://gdr turbulence.pmmh.espci.fr/Cargese/cargese-turbulence.html> or by email to turbulence@pmmh.espci.fr

We warmly acknowledge support from: CNRS, GdR Turbulence, ERCOFTAC (including France West PC), AFM (including GST 13: Fluid Mechanics and Turbulence), Observatoire de la Côte d'Azur, DGA.

GDR 2865 : « Structure de la turbulence et Mélange »

28 - 30 Janvier 2008

Cemagref, Rennes

Organisateur local: Dominique Heitz

Thèmes abordés :

- Analyse de données, traitement d'images, assimilation de données,

Animateur: Eric Blayo

- Couplage modèle - données, conditions aux limites instationnaires.

Animateur: Dominique Heitz

- Session "étudiant" en priorité pour les étudiants sur leurs "soucis" expérimentaux, numériques, théoriques...

Animateur: Yves Gagne

- Divers

Compte-rendu par Dominique Heitz

GDR TURBULENCE

Cemagref, Rennes
28-29-30 Janvier 2008

Couplage modèle - données

Analyse de données, traitement d'images, assimilation de données...

Session ouverte "étudiants" dédiée à leurs "soucis" d'ordre expérimentaux, numériques, théoriques

Compte-rendu de D. Heitz, J. Carlier & P. Héas

Les deux premières journées de cette réunion du GdR Turbulence ont été consacrées au couplage modèle-données. Les nouvelles approches expérimentales basées sur l'acquisition de séquences d'images à cadence élevée produisent une masse de données riche en information spatio-temporelle, dont la simulation des équations de Navier-Stokes peut tirer parti. A l'inverse, les données étant souvent bruitées ou incomplètes, les grandeurs à extraire de ces informations peuvent être estimées avec plus de robustesse et de cohérence, en s'appuyant sur les modèles de la dynamique des fluides. Dans ce contexte, le couplage modèles-données peut concerner la génération de conditions aux limites instationnaires pour les équations de Navier-Stokes, la simulation guidée par les données ou encore les méthodes de mesures basées sur les modèles. Dans tous ces cas l'assimilation de donnée constitue un outil de plus en plus incontournable. Un premier sous thème dédié à l'assimilation de données a été introduit par Eric Blayo, puis François Le Gland, tous les deux mathématiciens appliqués et spécialistes du domaine. Le second sous thème sur la génération de conditions aux limites instationnaires a été introduit par Christian Tenaud et Joel Delville. La troisième journée a été consacrée à des présentations sans thématique prédéfinie.

1 Analyse de données, assimilation, traitement d'images

Au cours du premier exposé d'introduction Eric Balyo présente **les bases de l'assimilation variationnelle de données**. A partir d'un exemple simple, il montre comment définir une fonctionnelle synthétisant les caractéristiques qu'il souhaite obtenir sur la solution optimale, en insistant sur l'aspect essentiel de cette définition. Le choix des normes utilisées dans cette fonctionnelle est crucial. Eric Blayo montre que si l'on choisit pour ces normes les inverses des matrices de covariance d'erreur (d'ébauche, d'observation...), l'approche variationnelle mène à l'estimateur BLUE bien connu en statistique. Pour les problèmes d'évolution, il introduit la méthode adjointe, qui permet de calculer à moindre coût le gradient de la fonctionnelle (mais au prix de l'écriture préalable du modèle adjoint). Enfin, Eric Balyo présente quelques exemples, afin d'illustrer la diversité des questions qui peuvent être abordées à l'aide de ces outils : assimilation de nombreux types de données, contrôle de différentes quantités (paramètres du système, erreurs...), analyse de sensibilité...

A la suite de cet exposé, Laurent Cordier demande si les modèles réduits ont déjà été abordés avec le formalisme de l'assimilation de données. Eric Blayo précise que différents travaux existent. A Grenoble (LEGI et LJK), ils ont regardé comment réduire l'espace dans lequel est effectuée la correction lors de l'assimilation de données (sans réduire le modèle). D'autres équipes (Navon et al. à FSU) étudient actuellement l'assimilation dans des modèles réduits. Comme pour le problème

seul de la réduction de modèle, la difficulté principale réside dans le choix du sous-espace dans lequel on va se placer. Enfin, récemment D'adamo et al. (J. of Turb, vol. 8, 2007) ont utilisé l'assimilation variationnelle pour construire un système dynamique réduit d'un écoulement turbulent.

Le second exposé, effectué par François Le Gland, présente **l'assimilation de données séquentielle et les méthodes de Monte Carlo**. François Le Gland détaille d'abord le principe de l'assimilation de données séquentielle dans un cadre bayésien assez général (comment combiner l'information a priori apportée par le modèle et l'information apportée par les données observées). Au passage, il nous éclaire sur les liens et les différences avec l'assimilation de données variationnelle (comment les variables de contrôles utilisées dans un cas correspondent aux bruits introduits dans l'autre cas). Il présente ensuite les méthodes de Monte Carlo avec interaction pour le calcul numérique de l'estimateur bayésien (filtres de Kalman d'ensemble vs. filtres particuliers). Enfin, François Le Gland montre comment appliquer ces méthodes quand le modèle *a priori* met en jeu des interactions de type champ moyen (par exemple dans l'estimation de champs de vitesse dans un mouvement fluide).

Christophe Baehr enchaîne par un exposé sur **le filtrage stochastique des mesures bruitées d'un fluide turbulent**. Considérant l'écoulement d'un fluide turbulent comme un flot stochastique discret, il propose une description probabiliste des mesures réalisées sur le fluide. Il obtient alors un processus à saut du type prédiction/correction familier des méthodes de filtrage non-linéaire. Cette modélisation permet ainsi d'aborder le filtrage des mesures faites sur un fluide turbulent. Pour le cas de l'observation des vitesses d'un fluide, Christophe Baehr utilise un modèle Lagrangien comme ceux développés par S.B. Pope. Le processus de filtrage nécessite alors un conditionnement des lois de probabilité à la série d'observation pour estimer les quantités Eulériennes de grandes échelles. Ce conditionnement à l'observation du noyau d'évolution Markovien constitue une nouvelle méthode de fermeture d'un modèle stochastique. L'algorithme d'estimation particulière à sélection génétique développé permet de présenter des applications de la méthode à des données simulées et réelles pour des écoulements géophysiques uni, bi ou tridimensionnels. La technique présentée permet alors d'obtenir une estimation à haute cadence de quantités caractérisant la turbulence.

Laurent Chevillard se demande si le repère considéré est Eulérien ou Lagrangien. Christophe Baehr précise qu'il s'agit de la trajectoire du capteur et que si le capteur est fixe on tombe sur le cas Eulérien. Laurent Chevillard s'interroge alors sur le calcul des spectres étant donné qu'on n'est ni dans un repère Lagrangien ni dans un repère Eulérien. Dans le cas présenté, le capteur étant fixe, les spectres sont estimés dans un repère Eulérien. Christophe Baehr complète sa réponse, en indiquant que la densité spectrale dans le cas général est celle du processus d'acquisition qui peut suivre n'importe quelle trajectoire. Alain Arnéodo demande alors dans quelle mesure, le modèle de Pope limité aux fonctions de structures d'ordre 2, est apte à caractériser des phénomènes d'intermittence. Le fait de considérer un modèle de Pope (sans prise en compte d'intermittence) conjugué avec une méthode d'assimilation non linéaire (particulière) permet de coller aux observations intermittentes. Christophe Baehr rajoute que c'est la capacité des particules à se brancher sur des différents points de l'espace des phases qui permet de suivre des épisodes intermittents. La discussion se poursuit sur le diamètre de boule mis en jeu dans la méthode et qui est constant. Christophe Baehr indique qu'une perspectives de son travail serait de rendre ce diamètre adaptatif en le reliant à des caractéristiques de la turbulence. Enfin une dernière question porte sur la relation entre les paramètres physiques et le diamètre des boules. Il est alors évoqué qu'il doit y avoir un lien entre le diamètre des boules et les covariances en assimilation variationnelle.

Un second exposé d'application des techniques d'assimilation séquentielle est effectué par Anne Cuzol sur le **suivi de champs de vitesse d'écoulements fluides par filtrage sto-**

chastique.

Thomas Corpetti présente des travaux mettant en œuvre **l'assimilation de donnée en météorologie**. Reconstruire la dynamique de l'atmosphère à partir de séquence d'image satellite est difficile en raison de la complexité des équations gouvernant la dynamique 3D de l'atmosphère, et parce que les observations satellites sont bruitées. Dans son exposé Thomas Corpetti détaille la façon dont il s'attaque au problème délicat de l'estimation – à partir de séquences d'images – de champs de vitesse cohérents et consistants en temps pour différentes hauteurs dans l'atmosphère. A partir d'une décomposition verticale de l'atmosphère, il propose deux estimateurs de mouvement atmosphériques distincts reposant sur différents modèles dynamiques multi-couches. Ces deux estimateurs utilisent l'assimilation de données variationnelle et sont appliqués sur des images satellites bruitées. Ces techniques permettent de reconstruire un état inconnu à partir d'un modèle dynamique et des données bruitées et incomplètes.

Une première question est posée par Alain Noullez sur l'avantage de la formulation div-curl par rapport à la formulation uv . Thomas Corpetti indique que du point de vue calculatoire, les modèles écrits en div-curl se manipulent mieux que sous leur forme uv . Une conséquence directe est que l'on n'a plus le problème de la mesure de la vorticit   ou de la divergence    partir du champ de vitesse car ces quantit  s sont directement estim  es. Dominique Heitz demande comment est calibr  e la matrice de covariance. Thomas Corpetti pr  cise que les matrices associ  es    la condition initiale et au mod  le dynamique sont constantes diagonales. Leur valeur num  rique sont fix  es en fonction de la covariance de la vorticit   et de la divergence. C'est le point d  licat de ces m  thodes. La matrice de covariance li  e    l'observation (qui donne la confiance entre les donn  es images et les mouvements mesur  s) est li  e aux gradients de l'image : quand ceux-ci sont faibles, on a une faible confiance en la mesure du mouvement r  sultant et inversement. ensuite une discussion s'engage sur le lien entre R (matrice de la covariance des erreurs sur les observations) et B (matrice de covariance de l'erreur sur l'  tat initial). Il s'av  re que dans les travaux pr  sent  s par Thomas Corpetti, ce n'est pas mod  lis   car l'  tat initial provient d'une m  thode ext  rieure. Cependant, cette m  thode ext  rieure s'appuie sur les gradients de l'image donc on pourrait effectivement mod  liser ce lien. Enfin, Alain Noullez s'interroge sur le r  le de la matrice R et sur la stabilit   de la simulation r  trograde des   quations de Navier-Stokes. Eric Blayo explique alors que la matrice R ne joue pas sur la stabilit   elle m  me. Le mod  le adjoint associ   aux   quations de Navier-Stokes est stable car le coefficient de diffusion est n  gatif. Le R influence le r  sultat de la simulation r  trograde mais n'influence pas la stabilit  .

Pour terminer cette premi  re journ  e Achim Wirth est revenu sur l'application des techniques d'assimilation s  quentielle avec une pr  sentation de **l'estimation des param  tres de friction dans un courant gravitaire oc  anique**. Il utilise un mod  le de gravit   r  duite ainsi qu'un filtre de Kalman d'ensemble (EnKF) pour   valuer la faisabilit   de l'estimation de param  tres de friction dans des courants gravitaires. Les deux lois de friction impl  ment  es sont la friction de Rayleigh lin  aire et une loi de train   quadratique. Achim Wirth montre que la proc  dure d'estimation de param  tre d  termine rapidement la friction totale mais prend plus de temps pour distinguer les deux lois. L'estimation de param  tres peut ainsi choisir la loi pertinente en estimant les coefficients pr  sents dans de tels param  trisations. Cliquez [ICI](#) pour t  l  charger la pr  sentation de Achim Wirth.

La seconde journ  e d  marre par une pr  sentation de Dominique Heitz sur **l'estimation du flot optique dans les   coulements turbulents**. Dans le cadre de l'estimation du mouvement    partir de s  quences d'images, deux familles d'approches se distinguent : d'un c  t   les techniques classiques de corr  lation qui sont robustes mais fournissent des champs   pars  s ; de l'autre c  t   les m  thodes de flot optique (ou m  thodes variationnelles) qui s'appuient sur un mod  le pour estimer un champ de vitesse dense (1 vecteur par pixel) et qui sont applicables sur plusieurs

types d'images (particules, scalaire). Le flot optique est défini comme le mouvement apparent permettant d'expliquer les variations d'une image à l'autre. Pour l'estimer on utilise un modèle d'observation (ou modèle d'attache aux données) reliant la luminance aux deux composantes du champ de vitesse apparent. Ce problème mal fermé ne permet que de mesurer la composante de vitesse suivant les gradients de luminance. Pour s'en affranchir l'approche globale proposée par Horn & Schunk (1981) consiste à estimer le champ de déplacement qui minimise une fonctionnelle d'énergie composée du terme d'observation et d'un terme de régularisation. Dominique Heitz montre l'importance du terme de régularisation dans la qualité des résultats, ainsi que le potentiel qu'offre ces approches pour introduire des *a priori* sur la dynamique des écoulements. Il présente un estimateur de flot optique dédié au mouvement fluide (Corpetti et al., Exp in Fluids, 2006). Plusieurs améliorations sont ensuite montrées : d'abord au niveau des méthodes numériques avec l'utilisation des différences finies mimétiques, puis au niveau de la robustesse par la construction d'un schéma combinant corrélation et méthode variationnelle, enfin au niveau de la consistance dynamique de la solution obtenue par l'utilisation d'une régularisation spatio-temporelle vérifiant les équations de Navier-Stokes. Plus de détails sur ces résultats peuvent être consultés sur le site du projet Européen FLUID (<http://fluid.irisa.fr>).

Yves Gagne engage une discussion sur l'incompatibilité apparente entre une régularisation globale effectuée sur l'image, et l'objectif d'améliorer l'estimation des petites échelles. L'explication est que l'on effectue une minimisation globale sur l'image d'une collection de problèmes joints de proches en proches par la régularisation. On peut ainsi améliorer l'estimation des petites échelles tout en assurant une cohérence globale de la solution. La décomposition de domaine et l'adaptation locale du paramètre de poids affecté à la régularisation sont des possibilités pour affiner l'estimation multi-échelle.

Patrick Héas enchaîne par une présentation d'une **technique de flot optique contrainte par les cascades d'énergie** pour améliorer l'estimation des petites échelles. Il montre comment introduire des *a priori* statistiques sur la turbulence dans les schémas d'analyse du mouvement dans les images. Pour cela il utilise les lois d'échelles des fonctions de structures qu'il introduit sous la forme d'un problème de minimisation sous contrainte. Il considère des incertitudes sur le modèle de cascade (prédictions de K41) et propose un apprentissage *a posteriori* des exposants des lois d'échelles. Une première validation de la méthode est montrée à partir d'une séquence d'images de particules dispersées dans une turbulence bidimensionnelle.

A la suite de l'exposé, Alain Noullez rappelle qu'en turbulence 2D, pour les fonctions structures d'ordre 2 l'exposant est 2 dans la cascade directe et identique dans la zone visqueuse, par conséquent avec ce type de contrainte on a tendance à lisser plutôt que d'imposer la cascade dans la zone intertielle. Laurent Chevillard suggère de tester la méthode sur un écoulement 3D de THI de façon à distinguer les contraintes appliquées, via les fonctions de structures, dans la zone inertielle et dans la zone visqueuse.

Llinca Nastase présente une **analyse des tourbillons de jets à l'aide d'un système PIV et d'une technique d'imagerie**. Dans le cas du jet rond, l'entraînement produit dans les régions de tresses est interrompu en présence d'anneaux de Kelvin Helmholtz qui écrasent les tourbillons secondaires et altèrent leurs effets d'induction. Au contraire, dans le cas du jet lobé, les anneaux de Kelvin Helmholtz sont segmentés ce qui autorise le développement de grandes structures longitudinales et améliore l'effet d'entraînement du jet.

2 Conditions aux limites instationnaires, modèles réduits

En première introduction à ce thème Christian Tenaud expose des travaux sur **la génération de conditions aux limites instationnaires dans le cadre des simulations aux grandes**

échelles.

Une seconde introduction est faite par Joël Delville qui présente des travaux sur la **génération de conditions d'entrée réalistes pour des simulations numériques instationnaires d'écoulements turbulents**. La stratégie consiste à générer, à partir de données expérimentales sous résolues temporellement et d'une approche de système dynamique d'ordre bas des conditions d'entrée représentative de la dynamique des structures à grande échelle de l'écoulement dans la section de mesure. Trois étapes sont nécessaires à une telle démarche : génération d'une base de donnée par mesure PIV stéréo sur deux plans décalés en temps ; construction d'un modèle d'ordre bas ; adaptation du maillage expérimental au maillage d'entrée de la simulation numérique. La méthode est validée sur le cas d'une couche de mélange plane turbulente. Yves Gagne demande quelle est le critère considéré pour fixer la charnière entre "mode dynamique" et "mode aléatoire". Joël Delville explique qu'il peut *a priori* traiter une centaine de modes mais qu'au delà cela pose un problème d'identification, lié à la dimension du problème à résoudre . Dans le contexte particulier de la PIV dual plane, il précise que pour évaluer l'importance du bruit il regarde les corrélations mode à mode entre les deux systèmes de PIV et observe en général une validité sur une quinzaine de modes, ce qui fixe une limite au nombre de modes pouvant être utilisés pour cette modélisation. Dans une approche de type PIV résolue en temps, on peut espérer utiliser plus de modes pour la partie "modèle dynamique".

Dans le cadre d'une modélisation réduite d'un écoulement, Martin Druon présente ses travaux sur la **modélisation d'écoulements fluides par approximation polynomiale**. La méthode proposée utilise des bases orthonormées de polynômes multivariés pour approximer des champs de vecteurs par une combinaison linéaire de ces fonctions polynomiales spécifiques. Ainsi, un champ de vecteur est caractérisé par sa base et quelques coefficients obtenus par sa projection sur cette base.

laurent Chevillard discute de la difficulté d'intégrer la notion d'incompressibilité dans la base. Martin Druon explique que cela ne pose pas de problème. Christophe Baehr demande ce qui a motivé le choix des polynômes, en comparaison à d'autres décompositions, comme par exemple les splines qui permettent de gérer la différentiabilité aux bords. Martin Druon justifie le choix des polynômes par la simplicité et la rapidité des calculs.

3 Thème divers

Laurent Chevillard détaille ses recherches sur la **déformation fluide récente pour les simulations des grandes échelles en turbulence**.

Pablo Cobelli présente une **nouvelle méthode de profilométrie par projection de franges pour mesurer en tout point la hauteur de la surface libre d'un liquide**. Cette technique de profilométrie optique consiste à projeter un réseau de franges sinusoïdales de caractéristiques connues sur la surface libre et à observer l'image projetée dans une autre direction. La déformation de la surface introduit une modulation locale de la fréquence du réseau de franges. L'analyse de l'image du réseau déformé est réalisée par une méthode de mesure spatiale de phase dans l'espace Fourier. Ce déphasage est directement relié à la hauteur du fluide. Le contenu de l'image dans l'espace de Fourier présente essentiellement trois pics. L'un d'eux est centré en zéro et correspond aux gradients faibles d'illumination. Les deux autres, centrés autour de $\pm f_0$, et associés à la fréquence du réseau projeté, contiennent toute l'information de la modulation de fréquence introduite par la déformation locale de la surface. La transformé inverse de Fourier de l'un de ces pics recentré à zéro donne la phase (modulo π) en chaque point sur la surface du liquide. Après un déroulement de phase, on peut convertir l'information de phase en hauteur en tenant compte des paramètres géométriques du montage optique. Cette méthode optique non

invasive à l'avantage de déterminer le profil de la surface étudiée à partir de l'acquisition d'une seule image, ce qui permet l'étude des écoulements en temps réel et des processus dynamiques fortement non-stationnaires. A titre d'exemples, les résultats de l'application de cette technique à deux écoulements différents sont présentés. Le premier cas montre que la méthode permet de mesurer conjointement des ondes spirales de faible amplitude ($< 1\text{mm}$) émises par un vortex de vidange ainsi que la profondeur du vortex (25 mm) sur une surface de $30 \times 40\text{cm}^2$. Le deuxième exemple correspond au régime d'interaction forte entre un vortex fixe et des ondes de surface planes. Ce dernier cas met en évidence le phénomène de dislocation des ondes et l'apparition d'un cône de dispersion prédit théoriquement mais jamais observé jusqu'alors dans de tels détails.

Une discussion est engagée par Philippe Gervais sur l'algorithme de déroulement de phase. Pablo Cobelli explique que cette technique accomplit une distinction entièrement automatique entre une dépression et une élévation de la surface. Pour assurer un bon déroulement de phase (sans ambiguïtés), la phase ne peut pas changer plus que π entre des pixels adjacents. Cela signifie que l'on doit employer une fréquence d'acquisition (résolution spatiale) supérieure à celle du Nyquist.

Aurore Naso expose un **formalisme de mécanique statistique appliqué à Euler axi-symétrique**.

GDR 2865 : « Structure de la turbulence et Mélange »

31 Mars - 2 Avril 2008

ENS-Lyon

Organisateur local: Laurent Chevillard

Thèmes abordés :

- Etude expérimentale de la turbulence d'onde

Animateur: Stéphan Fauve

- Singularités

Animateur: Uriel Frisch

- Intermittence, scalaire passif, grande déviation

Animateur: Krzysztof Gawedzki

- Physique Statistique

Animateur: Romain Monchaux

- Ecoulements de von Karman

Animateur: Florent Ravelet

- Divers

Animateur:

- Turbulence Lagrangienne, traceurs et particules

Animateur: Aurore Naso

Compte-rendu par Laurent Chevillard

Compte Rendu du GdR de turbulence du 31 mars au 2 avril 2008, ENS Lyon

I. AVANT-PROPOS

Le GdR de turbulence remercie les orateurs pour la qualité de leurs présentations. Il est proposé dans ce compte-rendu un résumé de leurs travaux, et je m'excuse par avance du caractère schématique de ces quelques lignes. J'encourage vivement les lecteurs de ce compte-rendu à consulter les présentations mises en ligne, et/ou prendre contact avec les intervenants.

Pour le GdR Turbulence, Laurent Chevillard.

II. LUNDI 31 MARS

A. Turbulence d'ondes

Animateur: Stéphane Fauve

- **Claude Cambon**, LMFA Centrale Lyon

Ondes, turbulence, turbulence d'onde une introduction ...

Collaborateurs: Fabien S. Godeferd, Julian F. Scott, Lukas Liechtenstein, Alex Delache, Benjamin Favier

Claude Cambon ouvre le GdR de turbulence, et plus particulièrement la session consacrée à la turbulence d'onde, en proposant une introduction générale à la notion d'ondes en turbulence. Il est rappelé les relations exactes issues des équations de Navier-Stokes, comme la relation de Karman-Howarth, et l'équation de Lin qui peut-être perçue comme un équivalent spectral de la relation de Karman-Howarth. Ensuite, diverses relations de dispersion sont exposées, ainsi que la notion de *triades*, qui est une représentation spectrale de la non linéarité des équations de Navier-Stokes.

- **Stéphane Fauve**, LPS, ENS Paris

Fluctuations de flux d'énergie en turbulence d'ondes et dans divers systèmes dissipatifs

Collaborateurs: E. Falcon, S. Aumaître, C. Falcon, C. Laroche

Stéphane Fauve présente les derniers résultats expérimentaux de son groupe. Un liquide (typiquement de l'eau ou du mercure) contenu dans une cuve est agité à l'aide de pistons. Une mesure locale de la hauteur de fluide permet l'étude des fluctuations de hauteur dans le cadre de la turbulence d'onde (régime d'ondes capillaires et de gravité). L'orateur présente une étude de la puissance injectée, définie comme le produit de la force appliquée au piston par sa vitesse (son signe est indéterminé). Ces deux dernières quantités pouvant être considérées comme gaussiennes (il est observé de plus que les variances respectives sont proportionnelles dans la gamme de paramètre explorée), elles sont modélisées par un système d'équations de Langevin couplé. Il est montré ensuite que la densité de probabilité de puissance injectée mesurée est décrite de manière très satisfaisante par ce modèle.

- **Eric Falcon**, MSC, Université Paris 7

Turbulence d'ondes à la surface d'un fluide

Collaborateurs: S. Fauve, S. Aumaître, C. Falcon, C. Laroche, U. Bortolozzo

A partir des mesures précédemment décrites (cf. S. Fauve), Eric Falcon présente les aspects locaux et multi-échelles des profils temporels de hauteur du fluide. Il est observé que le comportement en loi de puissance du spectre de puissance est bien décrit par la turbulence d'onde dans le régime capillaire, contrairement au régime de gravité (dans lequel de plus il est observé une dépendance dans les paramètres de forçage). Ensuite, l'orateur s'intéresse aux aspects d'intermittence. Il est montré, en réalisant une étude statistique des incréments du second ordre de hauteur, que le signal obtenu est hautement intermittent. Il est proposé une interprétation

basée sur la fluctuation du flux d'énergie. Dans une seconde partie, il est montré qu'une même étude réalisée en vol parabolique, permettant de s'affranchir de la gravité, permet d'étendre le régime capillaire à toute la gamme d'échelle accessible expérimentalement.

- **Claudio Falcon**, LPS ENS Paris

Interaction ondes-vortex

Il est étudié expérimentalement l'interaction d'un écoulement périodique de tourbillons avec l'écoulement cellulaire qu'engendre des ondes de surface. Le but de cette étude est de rechercher le changement du seuil de l'instabilité paramétrique en fonction de l'intensité de l'écoulement tourbillonnaire. Pour cela, il est construit une cuve contenant du mercure agité de manière contrôlée (paramétrique). Cet écoulement est ensuite mis en interaction avec un réseau de vortex engendré par un champ magnétique (couplage par une force de Lorentz). L'implication de la présence des vortex est quantifiée à partir d'estimateurs spectraux (typiquement les spectres de puissance) et de densités de probabilité. Il est montré que lorsque la vitesse de l'écoulement augmente, le seuil d'instabilité paramétrique augmente, et la corrélation et la cohérence des amplitudes locales des vagues diminuent.

- **Olivier Cadot** (UME ENSTA) et **Nicolas Mordant** (LPS ENS Paris)

Turbulence d'onde dans les plaques élastiques minces: expériences à l'ENSTA et à l'ENS.

Collaborateurs d'O. Cadot: A. Boudaoud, B. Odille, C. Touzé

Collaborateur de N. Mordant: C. Laroche

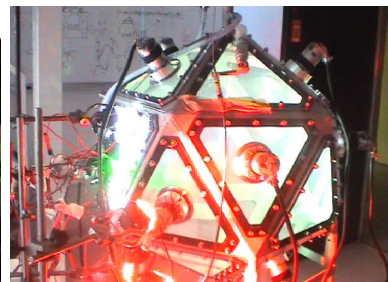
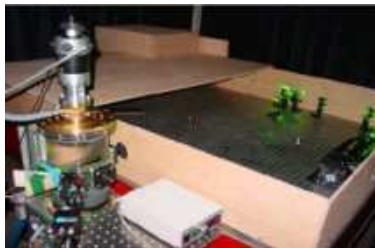
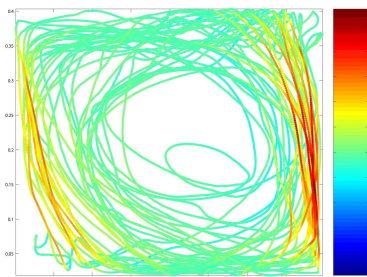
Ce travail d'expérimental est dédié à l'étude de la turbulence d'ondes et de la propagation de la déformation dans des plaques métalliques minces. Deux groupes disjoints proposent cette étude. Les orateurs ont décidé de proposer une présentation commune, justifiée notamment par des résultats et conclusions très similaires. Il est montré que pour un forage sinusoïdal à grande échelle, le spectre d'énergie présente une loi d'exposant de l'ordre de $-1/2$, un comportement spectral non prédit par une généralisation des prédictions de la turbulence faible. L'analyse des signaux de vitesse (plus précisément la composante normale à la plaque) permet d'autrepart de conclure à l'absence d'intermittence. Enfin, il est proposé une interprétation des mesures en terme de singularités afin de rendre compte des faits expérimentaux.

B. Visite du laboratoire de Physique

Animateur: Jean-François Pinton

Présentations des manips:

voir <http://www.ens-lyon.fr/PHYSIQUE/index.php?page=equipe2&langue=français>



- **Convection**: Mathieu Creyssel, Jean-Christophe Tisserand
- **Lagrangien - Vélocimétrie Laser Doppler**: Romain Volk
- **Lagrangien - LEM - Icosaèdre**: Yoann Gasteuil

III. MARDI 1 AVRIL

A. Singularités

Animateur: Uriel Frisch

- **Uriel Frisch**, Lab. Cassiopée, Observatoire de la Côte d'Azur

Hyperviscosité, troncature de Galerkin et effet bouchon.

Collaborateurs: W. Pauls (Goettingen), A. Wirth (Grenoble), S. Kurien and J.-Z. Zhu (Los Alamos), R. Pandit and S.S. Ray (Bangalore)

Cette étude théorique et numérique est consacrée à l'effet d'une troncature sur la dynamique des solutions des équations de Burgers et de Navier-Stokes. Il est montré que les solutions hyperdissipatives (caractérisées par le paramètre α correspondant à $\alpha = 2$ pour une solution classique visqueuse) tendent vers celles des équations tronquées lorsque $\alpha \rightarrow +\infty$. Ce résultat permet alors d'effectuer une modélisation des solutions des équations tronquées à l'aide de la fermeture EDQNM. Cette étude permet de mieux comprendre plusieurs phénomènes rencontrés en turbulence, comme le "bottleneck" (bouchon) du spectre de puissance, la "thermalisation" (dont la signature est un spectre de puissance en k^2) impliquant une gaussianisation des petites échelles et un "amortissement" de l'intermittence.

- **Walter Pauls**, Max Planck Institute, Gottingen

Singularités complexes des équations d'Euler et Navier-Stokes

Collaborateurs: T. Matsumoto, U. Frisch, J. van der Hoeven et A. Gilbert

L'ambition de cette étude est de tenter de répondre quant à l'existence de singularités en temps fini des équations de Navier-Stokes (le *Millennium prize* de la fondation Clay). Pour cela, il est proposé de poursuivre un programme, initié par Bardos et al., basé sur la notion de singularités complexes. Dans le cadre d'un développement asymptotique aux temps courts des équations d'Euler en 2D, il est montré que les singularités complexes sont fortement dépendantes des conditions initiales et sont donc non universelles. Il est d'autre part estimé numériquement que deux types de conditions initiales dans le cas 3D mènent à des singularités (dans un cadre asymptotique) différentes, montrant que la non universalité est aussi rencontrée dans le cas 3D. Le cas visqueux et des approches plus formelles constituent l'essentiel des perspectives.

- **Giorgio Krstulovic**, LPS ENS Paris

Modèle à deux fluides des équations d'Euler tronquées

Collaborateur: M.-E. Brachet

Il est proposé un modèle phénoménologique à deux fluides couplant une vitesse de grande échelle (décrite par une équation d'Euler tronquée) à un champ de température petite échelle (i.e. un champ d'excitations, au sens de Landau). Le couplage est réalisé par une viscosité effective et une diffusion thermique. Une fermeture de type EDQNM et une simulation numérique de type Monte-Carlo sont effectuées lors d'une étude plus avancée de ces termes de couplage. Ces deux études sont montrées cohérentes entre elles. Il est montré que les petites échelles du champ de vitesse peuvent être, en bonne approximation, considérées gaussiennes, et que l'écoulement fluide reste très proche du champ non perturbé (sans couplage) décrit par les équations d'Euler tronquées.

- **Carlos Cartes**, LPS ENS Paris

Description Eulérienne-Lagrangienne des Équations de Navier-Stokes

Les équations du mouvements associées au potentiel de Weber-Clebsch sont calculées. Elles dépendent d'un nouveau petit paramètre (τ , de dimension celle d'un temps). Elles sont similaires à la dynamique des équations de Navier-Stokes. Elles peuvent être perçues comme une généralisation de l'approche de Constantin et Ohkitani (lorsque $\tau \rightarrow 0$), dans laquelle la transformation Euler-Lagrange est imposée diffusive. Alors que dans l'approche précédente le Jacobien de la transformation Euler-Lagrange s'annule (à des temps interprétés comme étant des

temps caractéristiques du phénomène de reconnection vorticity), il est montré que cette pathologie ne se produit pas dans l'approche ici adoptée, à un τ fini. Des simulations numériques montrent que lorsque le paramètre τ est choisi bien plus petit qu'un certain temps caractéristique, probablement relié à un temps de reconnection vorticity, la simulation doit être arrêtée et réinitialisée.

- **Sébastien Galtier**, Institut d'Astrophysique Spatiale, Université Paris-Sud

Vent solaire : ondes, turbulence et MHD Hall

Dans une première partie, Sébastien Galtier utilise un formalisme de turbulence faible (cadre MHD Hall) afin d'expliquer les observations montrant un raidissement du spectre des fluctuations magnétiques. Les résultats obtenus sont satisfaisants, néanmoins pas nécessairement concluants (des résultats similaires peuvent être obtenus dans un cadre compressible). Dans un cadre de turbulence forte, dans lequel les modélisations sont plus difficiles, il est proposé un modèle en couche (couplant vitesse et champ magnétique) qui permet de reproduire le raidissement spectral observé. D'autre part, il est mentionné la possibilité d'obtenir des résultats exacts (de type Karman-Howarth) pour la MHD Hall reliant les statistiques d'ordre 3 avec l'échelle et les taux de dissipation.

B. Advection du scalaire passif - Intermittence - Processus stochastiques

Animateur: Krzysztof Gawedzki

- **Krzysztof Gawedzki**, Laboratoire de Physique, ENS Lyon

Grandes déviations dans l'advection turbulente

Cette étude théorique est consacrée aux méthodes d'applications des relations de fluctuation-dissipation, et plus généralement des outils de la mécanique statistique hors-équilibre, à la turbulence des fluides. Dans ce contexte, il est souligné l'importance de la description Lagrangienne. Les relations de fluctuations d'un système découlent de ses propriétés lors d'un inversement temporel, en particulier, celles de Evans-Searles ont été observées expérimentalement dans un régime stationnaire. L'orateur présente ensuite une généralisation de ces notions au cas du processus tangent (par exemple, le processus tangent de la vitesse est le processus des gradients spatiaux de vitesse), ce qui permet de définir des relations de fluctuations généralisées (multiplicatives), et une fonction de grandes déviations multiplicatives. Il est mentionné des pistes pouvant conduire à une étude expérimentale ou numérique de cette fonction fondamentale.

- **Raphael Chétrite**, Laboratoire de Physique, ENS Lyon

Relations de fluctuation et modèle de Kraichnan

Collaboration: K. Gawedzki

L'orateur reprend les résultats précédemment exposés par K. Gawedzki, c'est-à-dire la relation de fluctuation de Gallavotti-Cohen généralisée au processus tangent. L'orateur est amené à utiliser une forme multiplicative de la fonction de grandes déviations. Il est montré que cette fonction est accessible analytiquement dans le modèle de Kraichnan d'advection d'un champ de scalaire passif par un champ de vitesse Gaussien (δ -corrélé en temps). Cette fonction des grandes déviations est interprétée (dans le cadre de la mécanique des fluides, et plus particulièrement en terme de comportement des particules inertielles) et est constatée analogue à celle obtenue dans d'autres systèmes.

- **François Schmitt**, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences

Intermittence multifractale lagrangienne de scalaires passifs: théorie et analyse de données

Cette étude est consacrée à la comparaison entre les prédictions attendues des approches phénoménologiques de la turbulence (arguments dimensionnels et formalisme multifractal) et les données empiriques (expérimentales et numériques), avec une attention particulière donnée au cas des fonctions de structures mixtes du scalaire passif. Les aspects Eulérien et Lagrangien sont traités, et il est constaté que dans ces deux cadres de description, les données sont cohérentes entre elles. Dans une deuxième partie, il est présenté des mesures nouvelles adaptées à un milieu marin. Un flotteur Lagrangien est suivi et une étude préliminaire des mesures montre un accord avec les résultats connus de la turbulence (spectre de puissance et intermittence).

C. Physique Statistique

Animateur: Romain Monchaux

- **Raoul Robert**, Institut Fourier

De la turbulence à la finance: vers une thermodynamique du hasard sauvage.

Collaborations: J. Duchon, V. Vargas

Après avoir rappelé les résultats de son groupe (physique statistique de la turbulence 2D en déclin, dissipation des solutions faibles des équations d'Euler et de Navier-Stokes en régime inertiel), l'orateur souligne la difficulté de généraliser ses approches au cas des solutions fortes de la turbulence 3D. Une autre voie est proposée: celle consistant à synthétiser des champs vectoriels capables de reproduire les propriétés connues de la turbulence (skewness, intermittence et corrélations à longue portée), avec l'espoir de construire une mesure stochastique invariante par les équations fondamentales de la mécanique des fluides. Il est proposé une méthode de construction de tels champs vectoriels, basée sur le chaos multiplicatif de Kahane, dont la convergence est bien contrôlée lorsque la résolution tend vers zéro. L'incompressibilité est une des principales perspectives de ce travail.

- **Romain Monchaux**, L.E.G.I.

Mécanique statistique dans un écoulement de von Kármán turbulent

Collaborateurs: P. Diribarne, F. Ravelet, P-P. Cortet, P-H. Chavanis, B. Dubrulle, N. Leprovost, F. Daviaud, A. Chiffaudel

Il est proposé dans cette étude d'étendre les résultats connus de physique statistique en turbulence 2D de déclin au cas intermédiaire (entre la 2D et la 3D) d'un écoulement (stationnaire) turbulent axisymétrique, dit de von Karman. Il est montré que les grandeurs fonction de courant, moment cinétique et vorticité ne sont pas indépendantes et que des relations de fluctuations peuvent être formulées sur les variances de la vitesse et de la vorticité coarse-grain es (ou filtrées). Ces résultats théoriques sont comparés à des mesures dans l'écoulement de von Karman, basées sur des techniques de PIV. Il est constaté l'existence de relations entre fonction de courant, moment cinétique et vorticité, et dans un certain sens, les relations de fluctuations sont observées. Il est conclu, et observé, une forte beltramisation de l'écoulement, c'est-à-dire une alignement de la vitesse avec la vorticité.

- **Antoine Venaille**, Coriolis L.E.G.I.

Stabilité de jets dirigés vers l'est dans un modèle rudimentaire d'océan

Collaborateurs: F. Bouchet, E. Simonnet.

Il est recher  , dans cette étude, un modèle rudimentaire d'océan capable de reproduire un courant fort dirigé vers l'est, comme il l'a été observé. Dans le cadre de l'approximation quasi-géostrophique, il est montré que les modèles connus d'océan ne reproduisent pas ce fort courant, en particulier les solutions de Fofonoff prédisent un courant orienté vers l'ouest. Il est proposé un modèle de fonction de courant, appelé *Front de vorticité portentielle*, capable de reproduire la forme recherch e pour le courant. Une étude de stabilité linéaire est effectuée montrant l'existence de ce courant dans une certaine gamme de paramètre.

- **Freddy Bouchet**, INLN

Mécanique statistique hors équilibre des grandes échelles de la turbulence bidimensionnelle

Collaborations: F. Gallaire, H. Morita, F. Rousset, E. Simonnet, A. Venaille, J. Barré, T. Dauxois, S. Ruffo, D. Mukamel, Y. Yamaguchi, P.H. Chavanis, Y. Sota.

Les équations de Navier-Stokes   2D, avec un terme de Rayleigh (terme de friction) et un terme de forçage stochastique, sont étudiées numériquement et théoriquement. Il est observé numériquement que l'écoulement transite de manière aléatoire entre deux  tats préférentiels, l'un de grande échelle et l'autre de petite échelle. Il est montré que ces  tats sont proches des  tats stationnaires des équations de Navier-Stokes,  tats qui peuvent être prédits par des arguments issus de la physique statistique. Il est ensuite évoqué de possibles mesures expérimentales et des résultats théoriques obtenus dans le cadre des équations d'Euler 2D linéarisées avec forçage stochastique.

D. Écoulement de von Karman

Animateur: Florent Ravelet

- **Florent Ravelet**, Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse

Transition à la turbulence dans l'écoulement de von Karman symétrique

Collaborateurs: A. Chiffaudel, F. Daviaud.

L'orateur propose en première partie une introduction et une historique des études portant sur l'écoulement de von Karman, études qui se sont principalement déroulées en France. Ensuite, il présente ses résultats lorsque l'écoulement est forcé en régime contra-rotatif pur. Il est montré, à partir de mesures locales de vitesse (PIV) et de mesures globales de couple adimensionalisé, la transition de l'écoulement depuis un régime laminaire (Reynolds faibles), en passant par des régimes chaotiques (Reynolds intermédiaires), vers le régime turbulent (grands Reynolds). Trois échelles caractéristiques sont identifiées, l'échelle intermédiaire séparant le spectre "basse fréquence" présentant une loi de puissance en k^{-1} du spectre inertiel ("haute fréquence") de Kolmogorov (en $k^{-5/3}$).

- **Arnaud Chiffaudel**, SPEC (CEA Saclay)

Bifurcations turbulentes et transitions de une à deux cellules dans l'écoulement de von Karman asymétrique

Collaborations principales: F. Ravelet et F. Daviaud

L'écoulement de von Karman est ici étudié en régime contra-rotatif légèrement dissymétrique. Vitesse locale et couple global permettent de dessiner la topologie de l'écoulement. Trois nombres caractérisent l'écoulement: l'intensité et la dissymétrie du forçage, ainsi que le nombre de Reynolds. Suivant la valeur du paramètre de dissymétrie, il est montré que l'écoulement bifurque entre un état à une cellule, à un état à deux cellules. Ensuite, l'orateur se concentre sur la gamme de paramètre dans laquelle il a été observé des changements erratiques de champ magnétique dans l'expérience de von Karman Sodium (VKS). Il est montré de manière claire que le signal de couple obtenu dans l'eau est très similaire au signal de champ magnétique obtenu dans VKS, permettant de conclure quant à la nature hydrodynamique des inversements magnétiques dans VKS. Il est souligné l'importance d'un anneau central permettant de stabiliser la couche de mélange centrale.

- **Benoît Pier**, LMFA Centrale Lyon

Caractérisation expérimentale de la région de transition dans la couche limite produite par un disque en rotation

Collaborateur: F. Plaza

Il est proposé une étude expérimentale de la caractérisation de la couche limite d'un disque en rotation en fonction du nombre de Reynolds (basé sur la vitesse de rotation et le rayon du disque). Pour cela, une campagne de mesure est réalisée grâce à un fil chaud. Les spectres de fluctuations des séries temporelles obtenues montrent clairement une transition lorsque le nombre de Reynolds dépasse la valeur critique prédite par une analyse de stabilité linéaire. Il est de plus constaté un épaississement de la couche limite lorsque cette valeur est dépassée. Il est mentionné en perspective l'importance de la rugosité et des défauts du disque.

E. Divers

Animateur: Christophe Baudet

- **Benjamin Kadoch**, M2P2 (ex MSNM-GP Marseille)

Extreme Lagrangian acceleration in confined flow

Collaborateurs: W. Bos, K. Schneider

Les statistiques de vitesse Lagrangienne, et en particulier l'accélération, sont étudiées numériquement pour un écoulement 2D, soit périodique, soit en présence de parois. Il est montré que dans les deux cas, la vitesse Lagrangienne est fortement intermittente, cet effet étant d'autant plus important en milieu confiné, alors que le champ de vitesse Eulérien 2D se caractérise par une absence de fluctuations intermittentes. En se concentrant sur l'accélération, il est montré que l'essentiel de l'intermittence, dans le cas confiné, quantifiée à partir de la flatness de l'accélération redéfinie comme une fonction de la distance à la paroi, se concentre aux extrémités du domaine. Il est conclu que la l'influence des parois se manifeste sur la quasi-totalité du domaine.

- **Samriddhi Sankar Ray**, Indian Institute of Science, Bangalore

Burgers Equation and Hyperviscosity

Collaborateurs: U. Frisch, R. Pandit (Bangalore)

Cette présentation fait suite à celle donnée par U. Frisch dans la matinée. Les effets d'une troncature de Galerkin et d'une hyperviscosité sont étudiées dans le cadre des équations de Burgers (1D, pas de pression). Un comportement spectral caractéristique de la thermalisation est observé, néanmoins l'effet bouchon (*bottleneck*) est absent. Il est noté que le choc, lié au caractère compressible des équations de Burgers, se comporte comme un *trou noir* vis à vis des fluctuations thermalisées.

- **Patrice Le Gal**, IRPHE

Sur une idée de Pomeau: déferlement des vagues d'eau peu profonde

Collaborateurs: Y. Pomeau, T. Jamin, M. Le Bars, B. Audoly

Intervention rapide de Patrice Le Gal sur une étude expérimentale destinée à mesurer au cours du temps la longueur de crête d'une vague qui est en train de déferler. Il est mesuré que la crête croît comme la racine carrée du temps. Ce comportement avait été conjecturé par Pomeau en se basant sur un calcul simple de stabilité.

IV. MERCREDI 2 AVRIL

A. Turbulence Lagrangienne

Animatrice: Aurore Naso

- **Aurore Naso**, SPEC (CEA Saclay)

Turbulence lagrangienne, traceurs et particules

Collaborateur: A. Pumir

L'oratrice débute sa présentation avec une revue exhaustive de la turbulence Lagrangienne. Il est rappelé les lois de puissances attendues et vérifiées des statistiques à une ou deux particules (spectre de puissance, intermittence, corrélations à longue portée, loi de Richardson, particules inertielles, etc.,). Dans une deuxième partie, il est développé l'approche géométrique de la turbulence, basée sur des statistiques à quatre particules et plus généralement, sur la dynamique Lagrangienne du tenseur des gradients. Il est montré l'effet d'une anisotropie de grande échelle sur le comportement dans les échelles des gradients de vitesse filtrés, ainsi qu'une comparaison avec des mesures expérimentales et simulations numériques consacrées à ce type de statistiques.

- **Jérémie Bec**, Lab. Cassiopée, Observatoire de la Côte d’Azur

Clustering of heavy particles and ions in MHD turbulence

Collaborateurs: H. Homann, H. Fichtner and R. Grauer

Après avoir rappelé les résultats de son groupe sur la dynamique Lagrangienne des particules lourdes (topologie des phénomènes de regroupement de particules dans les régions de fort cisaillement, dimension de corrélation, densité de probabilité des densités locales du champ filtré), l’orateur présente de nouveaux résultats numériques sur la dynamique des particules en MHD. L’écoulement est obtenu en intégrant les équations du mouvement d’un fluide conducteur à un Prandtl de l’ordre de l’unité (situation *dynamo* fluctuante). Il est constaté la forte similarité des phénomènes de *clustering* en présence d’un champ magnétique B , et une étude statistique des phénomènes d’alignement de la vorticité avec B (de type *Batchelor*) est présentée. Il en est conclu que les particules chargées se concentrent de manière préférentielle dans les régions dominées par les  v nements d’anti-alignement ($\vec{\omega} \cdot \vec{B} < 0$).

- **Wouter Bos**, LMFA Centrale Lyon

Lagrangian acceleration in time periodic laminar flow

Collaboratrice: F. Raynal

Cette étude est consacrée à l’analyse statistique de la dynamique Lagrangienne dans un écoulement laminaire, et plus particulièrement périodique en temps et en espace. Des simulations numériques sont réalisées. Les auteurs étudient l’évolution des densités de probabilités des incréments de vitesse dans les échelles, et ce pour plusieurs fréquences (liées au temps de retournement de l’écoulement). Ces densités se déforment continûment. L’estimation des corrélations temporelles de l’accélération montrent sa rapide décorrélation (liée au changement rapide du signe) et la corrélation à longue portée de son module. Il est mentionné le lien avec le comportement des exposants de Lyapunov. Enfin, l’étude distincte des composantes longitudinales et transverses de l’accélération révèlent le lien étroit entre la forme des densités de probabilité et les corrélations temporelles de la composante transverse.

- **Enrico Calzavarini**, ENS-Lyon Physique

Quantifying clustering and segregation of particles and bubbles in turbulent flow

Collaborations: M. Cencini, F. Toschi, D. Lohse, M.Kerscher.

Il est présenté une étude numérique de la dynamique Lagrangienne des particules qui peuvent être lourdes (paramètre β) et inertielles (caractérisées par le nombre de Stokes St). Afin de caractériser les propriétés de *clustering*, il est estimé, sur une large gamme de résolutions et de nombres de Reynolds, les dimensions de Kaplan-Yorke et de corrélations, comme fonctions des paramètres β et St . Ensuite, afin de caractériser la morphologie des amas de particules, il est proposé une étude des “fonctionnelles de Minkowski” permettant d’évaluer de manière précise les propriétés volumiques, surfaciques et de courbure moyenne de ces agrégats. Enfin, il est proposé un nouvel estimateur permettant de caractériser les propriétés de ségrégation de ces particules.

- **Nauman M. Qureshi**, L.E.G.I.

Transport turbulent de particules matérielles.

Collaborations: M. Bourgoin, C. Baudet, A. Cartellier, Y. Gagne

Il est proposé une étude expérimentale du transport de particules lourdes non ponctuelles (typiquement de taille plus grande que l’échelle de Kolmogorov). L’écoulement est une turbulence de grille, et la technique de mesure est la diffusion ultrasonore. Les particules sont des bulles de savon, lesquelles pouvant être légères ou lourdes, grandes ou petites. Il est montré que la statistique de la vitesse est intermittente, néanmoins la densité de probabilité de l’accélération (donc non gaussienne) ne dépend que très faiblement des caractéristiques des bulles. Il est noté que cette indépendance vis à vis de la topologie des bulles doit être reliée au fait que l’intermittence des particules matérielles n’est pas trivialement reliée à l’intermittence des particules ponctuelles. Il est de plus souligné l’action des gradients (et incréments) de pression sur les statistiques obtenues.

- **Lauris Ducasse**, Institut Non Linéaire de Nice

Intermittent particle distribution in two-dimensional synthetic compressible turbulence

Collaborateur: A. Pumir

Motivé par de récents résultats expérimentaux (Cressman et al.), l'orateur propose une étude numérique de la dynamique Lagrangienne dans un écoulement 2D compressible. L'écoulement est de type synthétique, généré à partir de modes de Fourier (la compressibilité est imposée en se donnant l'orientation du vecteur d'onde par rapport à la vitesse). Il est estimé la probabilité d'occurrence des densités coarse-grainées à plusieurs échelles, depuis le dissipatif jusqu'à l'inertiel. Il est constaté que les inhomogénéités se développent plus rapidement dans le dissipatif que dans l'inertiel. Les résultats obtenus sont très proches de ceux obtenus dans le cas des particules inertielles, et il est montré qu'une fois renormalisées, les densités de probabilités ne dépendent que de la compressibilité.

- **Romain Volk**, Laboratoire de Physique, ENS Lyon

Mesures de l'accélération de particules inertielles par vélocimétrie Laser Doppler.

Collaborateurs: G. Verhille, N. Mordant, J.-F. Pinton

La dynamique de particules inertielles est suivie expérimentalement grâce à une technique Laser Doppler étendue permettant une très bonne résolution temporelle, et donc une mesure fiable de l'accélération. L'écoulement choisi est celui de von Karman, en régime contra-rotatif pur. L'algorithme permettant d'extraire la vitesse des particules à partir des signaux de diffraction et les limitations expérimentales sont détaillés. Les densités de probabilité de l'accélération, ainsi que ses corrélations temporelles, sont observées similaires à celles obtenues par d'autres groupes. Les résultats sont comparés avec des simulations numériques (par E. Calzavarini, D. Lohse, F. Toschi). L'accord est qualitatif pour les particules de petites tailles, et en désaccord sur les effets de taille.

GDR 2865 : « Structure de la turbulence et Mélange »

13 - 16 Mai 2008

Oléron

Réunion conjointe avec le GDR Contrôle

Organisateur: Philippe Petitjeans

Thèmes abordés :

- Comment prendre en compte la turbulence dans des modèles dits «linéaires»

Animateur: Alessandro Bottaro

Compte-rendu par Alessandro Bottaro

- Turbulence hors équilibre et contrôle : effets des actionneurs sur les équilibres et la dynamique de la turbulence

Animateur: Jean-Paul Bonnet

Compte-rendu par Jean-Paul Bonnet

- Prise en compte des perturbateurs dans un écoulement turbulent

Animateur: Azéddine Kourta

Compte-rendu par Azéddine Kourta

- Application au contrôle de la génération multi-échelle de turbulence

Animateur: Christos Vassilicos

Compte-rendu par Sylvain Laizet et Christos Vassilicos

- Divers

Animateur: Wouter Bos

Compte-rendu par Wouter Bos

**Report on the meeting of the GDR's "Turbulence" and "Control of Flow Separation",
Ile d'Oléron, May 13-16, 2008-06-06**

Session on "Linear models of transition and control"

This session was based on only two contributions, one by A. Bottaro, DICAT, University of Genova and one by A. Sempey, LEPTAB, University of La Rochelle.

Bottaro presented a model of the early stage of transition in a duct, based on a triple decomposition of the flow variables. The model considers a set of equations for a nonlinear distorted base flow and a set for the disturbance variables. An optimisation procedure based on adjoint equations is set up, aimed at maximising the amplification of the disturbances, over a fixed time frame. It is found that a disturbance wave can grow on top of a distorted mean flow; through the action of the Reynolds stresses the wave feeds a streamwise vortex. The lift-up effect is then the cause of the amplification of a streak out of the vortex. The model produces realistic initial flow patterns, very similar to the unstable "edge state" which can be found to mediate the transition process. Direct simulations of the transition to turbulence have then been conducted, highlighting the fact that classical optimal disturbances (i.e. streamwise homogeneous perturbations) are inefficient at initiating transition, whereas the optimal wavy perturbations found here can trigger early transition at small values of the inlet disturbance amplitude. Finally, calculations of 2D minima defects have been shown; such defects are similar to the flow states set up shortly after the inlet by the optimal wave, but present much sharper gradients. More details can be found on: D. Biau & A. Bottaro, "An optimal path to transition in a duct", invited paper in *Phil. Trans. Royal Soc. London* (2008).

Sempey presented a computational model of the thermal feedback control of the air ventilation in a room, taking into account the interior temperature distribution and air velocity field. Models, based on CFD, give this information but they are improper for real-time applications. Therefore, a reduced model is needed. So the size of a CFD model is reduced by first considering the velocity field fixed and solving only the energy balance equation, then putting this equation in the form of state-space and finally by reducing its order by Proper Orthogonal Decomposition (POD). This algorithm was applied to a room equipped with a fan coil. The state space form of the reduced order model allows to estimate the temperature in the occupancy zone, without a direct measurement, and to feedback it to a controller. Several controllers were compared, all of which were designed with the internal model theory.

Turbulence et contrôle (JP Bonnet, LEA, 14 mai 2008).

Dans une première étape, on rappelle l'importance variable de la prise en compte de la turbulence dans les approches de contrôle. En effet de nombreux exemples de stratégies de contrôle montrent que des approches linéarisées, typiquement par études de stabilité, méthodes de contrôle optimal, etc. sont suffisantes pour l'analyse et la prévision de certains écoulements contrôlés, même dans une extrapolation à des nombres de Reynolds correspondant à des états turbulents développés. Dans de nombreuses applications la dynamique tourbillonnaire est prépondérante et la turbulence peut être considérée comme intervenant « au second ordre ». Si cette situation est avérée dans certains cas (le plus souvent des écoulements libres de type sillage ou couches de mélange), le caractère turbulent reste essentiel dans d'autres cas. En particulier la réduction de traînée turbulente nécessite la prise en compte explicite de la turbulence. On rappelle les résultats de *Fronhpfel – Jovanovic – Durst JFM 2006*) qui mettent en évidence l'influence des polymères, surfactants, gradients de pression et régime supersonique sur le comportement à la limite en paroi de l'équilibre entre les invariants II et III introduits par Lumley. Il semble que la réduction de frottement turbulent soit associée à l'évolution vers une turbulence « 1 composante », ce qui avait aussi été montré dans le cas des « ribblets ».

La turbulence reste essentielle pour « ajuster » la dynamique à travers les interactions non-linéaires et les effets de la dissipation turbulente en particulier. Ceci est illustré par les analyses spectrales et les bilans d'énergie de plusieurs écoulements contrôlés (on rappelle le cas des « LEBU » *Lemay, Delville, Bonnet 1990*). Dans ce cas l'énergie des hautes fréquences ou petites échelles correspondant au domaine dissipatif est artificiellement augmentée par l'émission des structures en aval de la lame formant le « LEBU ». C'est aussi le cas du contrôle *actif* d'un jet turbulent par actionneur piezzo dans l'expérience de *Wiltse et Glezer PoF 1998*. Des phénomènes équivalents sont observés dans le cas du contrôle de jets par micro-jets (*Laurendeau-Bonnet-Jordan-Delville, TSFP 2005, Bénard-Bonnet-Touchard-Moreau, AIAA J. 2008*). Enfin, dans le cas du contrôle de la zone de mélange se développant au dessus d'une cavité, le contrôle par introduction d'un barreau (*Staneck 2002-5*) introduit aussi de façon passive des structures à petite échelle correspondant au domaine dissipatif de l'écoulement de base.

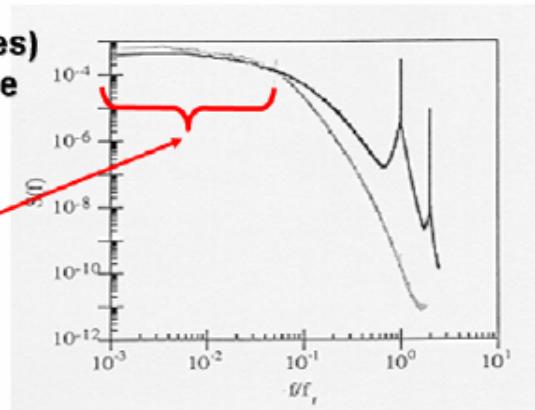
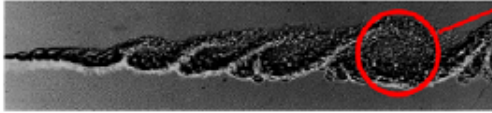
La question alors soulevée est de savoir si l'apport d'énergie dans le domaine dissipatif est une voie de contrôle des écoulements turbulents et quelle dynamique turbulente est sous jacente, en particulier en fonction de structures à grande échelles qui sont le plus souvent l'objet du contrôle (pour les applications au contrôle de mélange et de bruit).

Ceci a conduit à envisager que la dissipation turbulente pouvait *piloter la cascade énergétique*. Cette interprétation donnée initialement par Wiltse et Gezer est remise en cause par les analyses de Staneck (2002 et thèse 2005) dans le cas du contrôle de la cavité par création de fines structures dans le sillage d'un barreau..

Le débat vient du fait que la cascade impose *de façon conservative* de dissiper l'énergie (u^2) sur des échelles de temps en L/u , soit à des taux en u^3/L . Ce taux ne fait pas intervenir la viscosité ce qui conduit à poser, de façon conventionnelle, que la dissipation doit s'adapter à l'énergie qui alimente la cascade. Dans cette perspective, l'introduction d'énergie supplémentaire dans le domaine dissipatif *ne devrait pas piloter* l'énergie des grandes échelles.

How Does High Frequency Flow Control Work ?

The Largest Scales (lowest frequencies) Lose energy after HF forcing, while the Smallest Scales gain energy. Why?



Wiltse / Glezer

Description or Model of HF Forcing Effect
(Wiltse & Glezer, AIAA-96-0309)

Drop In Turbulent Kinetic Energy At Low Frequencies Is Caused By An Accelerated Transfer Of Energy From Low Frequencies To High Frequencies
(Accelerated TKE Cascade)

Stanek Description or Model of HF Forcing Effect

(Stanek et. al., AIAA-2002-2272, AIAA-2002-2404)

Drop In Turbulent Kinetic Energy At Low Frequencies Is Caused By Decreased TKE Production Due To Turbulent Shear Layer Stabilization
(Decelerated TKE Cascade)

Une des difficultés vient du fait que dans plusieurs configurations, l'augmentation de l'énergie du domaine dissipatif est concomitante avec une modification des champs moyens qui conduisent à modifier les termes de production. Ainsi il est difficile de séparer les deux effets et les interprétations des effets sur la cascade qui en découlent. Il faut noter que dans le cas de Wiltse et Glezer toutefois, la méthode de contrôle ne doit pas modifier les champs moyens, ce qui n'est à l'évidence pas le cas de la configuration du barreau en amont de la cavité (voir les résultats de *Daude*, thèse *Dafe* 2007 rapportés par *P. Comte*).

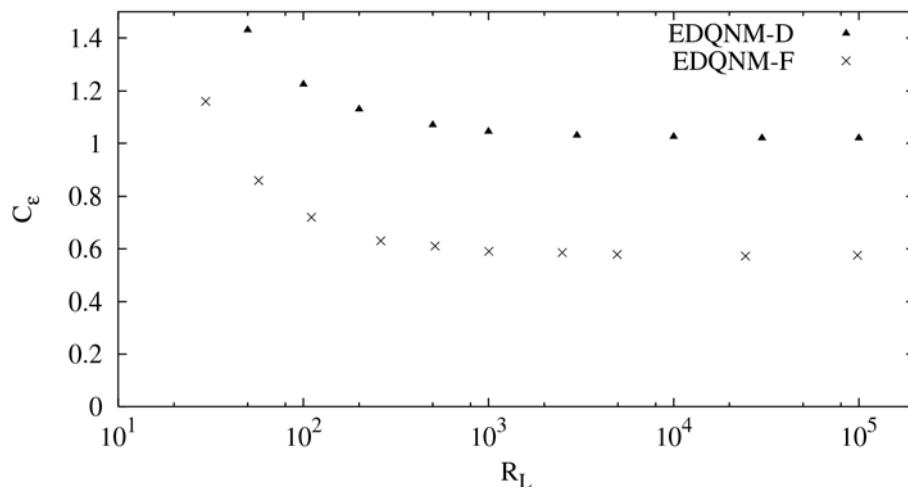
Des études en turbulence homogène isotrope, THI, sont une excellente voie d'analyse fondamentale. Une tentative faite à Lyon (*Michard- Mathieu- Morel- Alcaraz-Bertoglio ETC* 1987) était une tentative remarquable (THI avec des ailettes) mais trop peu développée. Les études de grille vibrante (*Oberlack* 2008) peuvent aussi apporter des informations précieuses, ainsi que, dans le domaine passif, les grilles fractales de C. Vassilicos (voir plus loin dans le workshop).

La question du pilotage de la dissipation par la production, ou de l'accélération de la cascade par la création d'échelles dans le domaine dissipatif reste donc une question ouverte.

Les travaux du groupe de Lyon (Bos, Shao et Bertoglio (LMFA)) viennent compléter ces réflexions. Ils étudient le déséquilibre spectral par voie numérique et analytique (Phys. Fluids 2007). L'effet de ce déséquilibre peut être caractérisé par la variation du paramètre C_ε , introduit dans la relation classique liant la dissipation à l'échelle intégrale (relation implicitement admise dans tous les modèles en 1 point):

$$\varepsilon = C_\varepsilon U^3/L$$

avec U et L les échelles intégrales de vitesse et de longueur de l'écoulement. Une étude récente de l'équipe d'Antonia (Phys. Fluids 2005) affirme que dans les DNS de haute résolution, C_ε tend vers une valeur constante qui est approximativement identique pour une turbulence maintenue stationnaire par forçage et pour la turbulence en déclin. Les résultats obtenus au LMFA en LES, ou par fermetures spectrales (EDQNM), montrent que ce n'est pas le cas: le rapport de la valeur de C_ε pour la turbulence en déclin et celle de C_ε pour la turbulence forcée peut varier d'un facteur 2 (voir figure 2, D=turbulence en déclin, F=turbulence forcée, R_L = nombre de Reynolds). Ce résultat remet en question l'initialisation et le forçage des simulations directes et des expériences de la turbulence.



Compte rendu du thème « Prise en compte des perturbateurs dans un écoulement turbulent »

Par Azéddine Kourta.

Oléron du 13 au 16 mai 2008

Mercredi 14 mai 2008 (après midi)

Thème : Prise en compte des perturbateurs dans un écoulement turbulent

Pour mettre en œuvre un contrôle actif d'écoulement, on utilise des actionneurs. Ce thème s'intéresse à la façon de caractériser les effets des perturbations induites sur la turbulence aussi bien de point de vue phénoménologique qu'énergétique et à la détermination d'éventuelles conséquences sur les performances du système contrôlé.

Animateur: **Azeddine Kourta,**

Introduction: **Louis Cattafesta**

Louis Cattafesta (Florida state university) : Contrôle d'écoulements en boucle fermée: leçons retenues et le futur

Cette présentation montre le programme de recherche mené sur le contrôle actif des écoulements, un champ multidisciplinaire incluant la dynamique des fluides, la fabrication des capteurs et actionneurs (« transducteurs »), et la théorie du contrôle. Ce domaine de recherche concerne la manipulation des écoulements pour un grand nombre d'applications, incluant le bruit aérodynamique, le contrôle des décollements, l'augmentation du mélange et la réduction de la traînée, etc. La plupart des études dans ce domaine concernent le contrôle en boucle ouverte. La mise en œuvre de boucles fermées est moins rencontrée peut être à cause de la complexité inhérente au système dynamique gouverné par la dépendance en temps et la non linéarité des équations aux dérivées partielles (équations de Navier Stokes). Cet exposé dévoile quelques voies importantes pour l'implantation physiquement réalisable d'un contrôle en boucle fermée (feedback) en temps réel. Les aspects relatifs aux capteurs, actionneurs, et à l'identification adaptative ou les algorithmes de contrôle sont discutés dans le contexte des oscillations générées dans un écoulement de cavité et du contrôle des écoulements décollés.

Pour effectuer le contrôle en boucle fermée, il faut trouver des capteurs adaptés, en général des MEMS ou autres actionneurs fonctionnant en temps réel (c'est-à-dire sur un intervalle de temps inférieur à l'intervalle d'échantillonnage Δt). Il y a également le problème d'échelle caractéristique ($S = fL/U = \text{constante}$) f est proportionnelle à U/L . Cependant la plupart des expériences sont dimensionnées à l'avance (f croît alors Δt décroît). Le choix de l'actionneur dépend de l'échelle. Ce dernier doit avoir une large bande, linéaire, à réponse dynamiquement plate, robuste et peu coûteux. Louis Cattafesta a également parlé des actionneurs de type jet synthétique et des considérations pour la boucle de feedback. Il a mentionné l'utilisation des algorithmes adaptatifs pour le contrôle en boucle fermée (modèles autoregressifs ARMAX, ARMARKOV, ARMARKOV TOEPLITZ) appliqués à un écoulement de cavité. Dans sa présentation, il a développé le rejet adaptatif des perturbations et a parlé des actionneurs de type jet synthétique 3D.

Patrick Gilliéron (Renault): Aérodynamique automobile, résultats et perspective du contrôle

Après avoir développé les motivations du contrôle de l'aérodynamique pour les constructeurs « automobile », P.G. a parlé du contrôle passif (vortex generator, plaques séparatrices), il s'est intéressé ensuite à la mise en œuvre du contrôle actif (soufflage, aspiration, jet synthétique, ...) sur le corps de Ahmed pour agir sur le bulbe décollé et / ou sur les tourbillons longitudinaux. Il a ensuite fait le bilan des gains suivant la combinaison des effets de plusieurs actionneurs différents.

Jacques Borée (LEA Poitiers) : a développé une méthode d'identification de topologie d'un écoulement tridimensionnel en aérodynamique instationnaire par l'intermédiaire de mesures obtenues par différents moyens expérimentaux (PIV ou visualisations pariétales). Les principaux résultats sont reconstitués à l'aide d'une technique de snapshot POD construite à partir des mesures locales instantanées. Une méthode de reconstruction Lagrangienne sur un temps fini a été développée pour obtenir une image correcte de la structuration des écoulements autour des points de stagnations (décollements et recolllements locaux).

Roamain Jussot (Institut PRISME Orléans) : a parlé de la caractérisation aérodynamique d'un actionneur plasma et son application au contrôle des décollements turbulents. L'actionneur a été appliqué pour contrôler le décollement sur un profil d'éolienne. Il a également mentionné son utilisation pour contrôler le bulbe du décollement et les tourbillons longitudinaux au culot d'un corps de Ahmed (3 actionneurs).

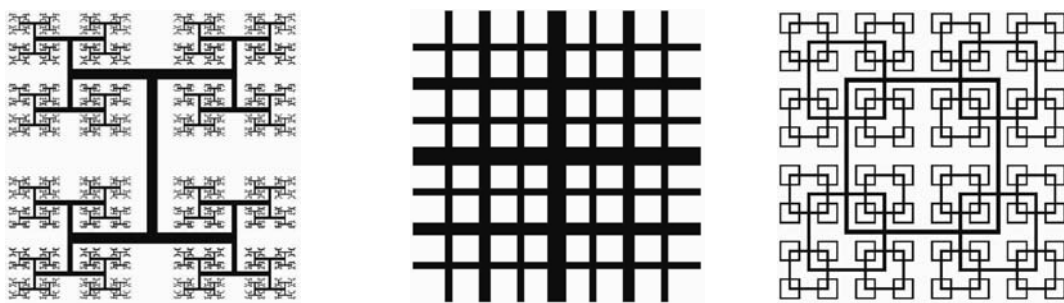
Joël Delville (LEA Poitiers) : A présenté le développement de modèles pour le couplage calculs/données. Les travaux ont été effectués dans le cadre des programmes Wallturb (UE) et Calin (ANR). Dans ce travail, les auteurs ont utilisé la POD sur des mesures PIV résolues dans le temps, par comparaison entre POD sur run long et sur run court. Cela a permis d'explicitier le comportement spectral des coefficients $a(t)$ de cette décomposition pour lesquels des comportements autosimilaires ont été trouvés. Ceci conduit à un modèle unique pouvant faciliter l'application d'un contrôle.

José Edwardo Wesfreid (ESPCI) : présente un complément sur le contrôle du décollement par vortex generator en explicitant l'effet sur la modification de l'écoulement de base : mode zéro qui est la différence entre écoulement perturbé par l'actionneur et écoulement non perturbé en l'absence d'actionneur.

1-Application au contrôle de la génération multi-échelle de turbulence

Au cours du premier exposé d'introduction, Christos Vassilicos présente les derniers résultats expérimentaux réalisés à l'Imperial College sur des essais en soufflerie réalisés derrière des grilles dites 'fractales' dont le but est de générer une turbulence multi-échelle.

La turbulence est constituée de structures à une multitude d'échelle, souvent en équilibre qui résultent de mécanismes non-linéaires de transfert d'énergie. Afin de mieux comprendre cette nature multi-échelle et la dynamique de la turbulence, Christos Vassilicos et son équipe de recherche à l'Imperial College London ont donc décidé d'étudier expérimentalement la turbulence générée en aval d'une grille fractale. (Voir figure ci-dessous)



La particularité de ce type de grille est d'être construite sur une série d'itérations d'un motif de base (un carré, un I ou une croix) à différentes échelles ceci ayant pour objectif de créer un forçage multi-échelle de l'écoulement contrairement aux grilles à mailles régulières. Il existe bien sur plusieurs paramètres pour décrire une grille fractale (sa taille totale, son nombre d'échelle, le rapport de dimension entre les échelles et les largeurs de maille et la solidité de la grille). Les champs de vitesse ont été mesurés à l'aide d'un dispositif d'anémométrie à fils chauds à température constante.

Les mesures de taux de turbulence dans le cas de la grille avec motif en carré révèle la présence de deux régions aux comportements distincts, indépendamment de la vitesse imposée en entrée de veine d'essai. Ce premier résultat suscite un certain nombre de questions dans l'assemblée. Ensuite, Christos Vassilicos détaille les caractéristiques de ces deux régions : une région dite de production qui est marquée par la présence d'une instabilité grande échelle et, en aval de cette zone de production, une région de turbulence en décroissance est observée avec des propriétés différentes par rapport à une turbulence homogène isotrope classique. En effet, un taux de dissipation inversement proportionnel au nombre de Reynolds est clairement mis en évidence dans ces résultats expérimentaux dans la région de turbulence en décroissance, même si cette turbulence a un spectre classique en $-5/3$ bien défini. Une large discussion s'engage alors sur les conséquences et les possibles raisons de ce comportement particulier.

Christos Vassilicos laisse ensuite la parole à Nicolas Mazellier. L'un des objectifs des travaux présentés ici est de montrer que la constante universelle de dissipation n'est pas universelle car dépendante de la topologie grandes échelles de l'écoulement. Nicolas Mazellier présente des résultats expérimentaux derrière plusieurs grilles classiques mais aussi des écoulements de jets et enfin des résultats expérimentaux avec plusieurs grilles fractales. Cette étude est basée sur la technique dite des

points de stagnation. Elle consiste à étudier dans un écoulement les points où la vitesse est nulle. Une discussion s'engage alors pour savoir ce que signifie exactement un point de stagnation (Vitesse nulle des trois composantes? Vitesse et accélération nulle?). La démonstration présentée par Nicolas Mazellier est basée sur la relation entre ces points de stagnation et les différentes échelles de l'écoulement, suite à des travaux réalisés à l'Imperial College par Christos Vassilicos et ses collaborateurs.

Enfin, pour terminer la matinée, Sylvain Laizet présente les premiers résultats numériques réalisés sur des grilles fractales avec un code de calcul développé pendant sa thèse à l'Université de Poitiers au Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques. C'est un code de calcul aux différences finies qui utilise des schémas d'ordre six. La particularité de ce code est que l'équation de Poisson est résolue dans l'espace spectral à l'aide de Transformée de Fourier Rapide et en utilisant le formalisme du nombre d'onde modifié. Grâce à cette astuce, il est possible de résoudre de manière directe, l'équation de Poisson. Cette résolution spectrale impose d'avoir une stricte équivalence entre tous les opérateurs. Pour la résolution d'écoulement avec prise en compte d'un obstacle dans l'écoulement, comme par exemple une grille fractale, il est possible de combiner le code avec une méthode de forçage directe. Le principe de cette méthode est assez simple puisqu'il suffit d'imposer via un terme de forçage dans les équations de Navier-Stokes une vitesse nulle dans l'obstacle. Cette méthode assez basique permet de simuler des écoulements relativement complexes. Sylvain Laizet présente quelques résultats obtenus avec ce code de calcul dans le domaine de la turbulence et du contrôle : un écoulement de couche de mélange avec prise en compte du bord de fuite (épais ou mince), simulation d'une marche montante avec un bord arrondi à rayon de courbure variable et enfin une simulation d'une expérience d'un chevron fluide. Pour finir sa présentation, il montre les tous premiers résultats d'une simulation réalisée derrière une grille en forme de croix avec des résultats assez proches des expériences bien que le nombre de Reynolds soit réduit pour des raisons évidentes de coût de calcul. La séance de travail se termine sur quelques films de cet écoulement.

Compte rendu du thème *Divers*

Intervenants :

- Cathérine Marais, (PMMH-ESPCI)
- Johan Carlier (Cemagraf Rennes)
- Jacques Borée (LEA Poitiers)
- Laurette Tuckerman (PMMH-ESPCI)
- Lionel Fabiane (PSA Peugeot Citroën - ENSTA)
- Pierre Comte, (LEA, Poitiers)

Animateur & Compte Rendu :

- Wouter Bos

Cathérine Marais, (PMMH-ESPCI) présente ses travaux menés en collaboration avec R. Godoy-Diana, D. Barkley and J. E. Wesfreid : 'Réponse impulsionnelle dans le sillage d'un cylindre en régime sous-critique'. Ils étudient expérimentalement la réponse impulsionnelle du sillage d'un cylindre en régime sous-critique ($Re < 47$), dans un tunnel hydrodynamique. Des travaux expérimentaux précédents [Croquette & Le Gall, Phys. Rev. E 62, 3 (2000)], basés sur l'évolution spatiotemporelle des lignes d'émissions obtenues par des visualisations avec du colorant, ont permis d'analyser qualitativement l'évolution d'une perturbation. Ici ils obtiennent des mesures quantitatives dans le sillage du cylindre en utilisant la méthode de Vélocimétrie par Images de Particules (PIV) à deux dimensions. Ils peuvent ainsi décrire précisément l'évolution du paquet d'ondes produit par une petite perturbation dans le sillage sous-critique. Ils perturbent l'écoulement en imposant au cylindre un mouvement de rotation très bref d'amplitude $\delta\theta$. Le temps de perturbation (adimensionné par le temps de convection) est gardé constant, tandis que l'amplitude de la perturbation est variée, ce qui permet d'utiliser le rapport $V_{rotation}/U_0$ (U_0 étant la vitesse d'entrée dans le tunnel) comme paramètre de contrôle. Pour chaque expérience ils déterminent, en utilisant les diagrammes spatiotemporels des champs de la vitesse transversale (voir Figure 1.a) la position en temps et espace de l'amplitude maximale de perturbation, ainsi que les vitesses de groupe, et de fronts du paquet d'onde. De plus, ils caractérisent le comportement de la courbe de l'énergie en fonction du temps (voir Figure 1.b), en fonction du nombre de Reynolds. Par ailleurs, le calcul numérique (2D DNS) des taux de décroissance de l'instabilité convective en fonction du nombre de Reynolds se compare très favorablement à leur mesures.

Johan Carlier (Cemagraf Rennes) intervient une première fois pour témoigner du comportement d'un écoulement d'air observé à plusieurs reprises au laboratoire, notamment dans les caissons de mise en pression des souffleries. Ce comportement peut se rapporter ainsi : un écoulement d'air dans un canal présente en aval d'une mousse de mise en pression une zone de survitesse au dessus de la couche limite. Cette survitesse dans le profil crée un point d'inflexion

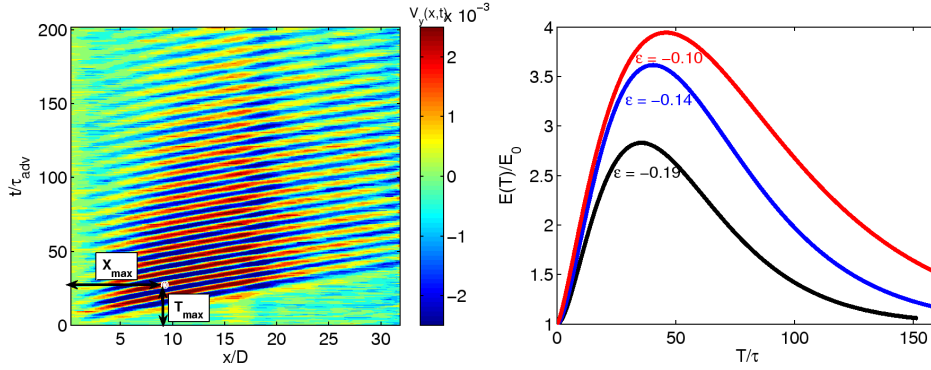


FIG. 1 – (Gauche) Diagramme spatiotemporel pour $\epsilon = (Re - Re_c)/Re_c = -0.14$. (Droite) Courbes d'énergie en fonction du temps pour différents nombres de Reynolds.

susceptible de générer une turbulence non désirée. Philippe GERVAIS suggère que cette survitesse peut provenir de la diffusion importante de l'écoulement dans la mousse. A proximité de la paroi, cette diffusion serait bloquée et une survitesse apparaîtrait.

Il intervient une seconde fois pour présenter un travail effectué en collaboration avec Nicolas Papadakis sur l'assimilation variationnelle des systèmes dynamiques réduits. Une PIV résolue en temps a été effectuée dans le sillage d'un cylindre circulaire pour un nombre de Reynolds de 3900. La POD a été appliquée sur la séquence des 3072 champs de vitesse obtenus. Les équations de Navier-Stokes ont ensuite été projetées sur cette base. Les modes temporels et leurs dérivées étant disponible, les coefficients du système dynamique réduit ont été identifiés par identification polynomiale. Toutefois, l'intégration temporelle d'un tel système ne permet pas de reproduire les modes temporels observés. Pour remédier à cela, on cherche la condition initiale et les coefficients du système dynamique qui minimisent une fonction coût notamment basée sur l'écart entre les modes observés et les modes calculés. Un nouveau système est alors obtenue nécessitant successivement et itérativement l'intégration directe du modèle et indirecte de l'adjoint jusqu'à convergence. L'efficacité de la démarche a pu être démontrée en assimilant les 16 premiers modes contenant 80% de l'énergie sur une période de 3 lâchées tourbillonnaires. Cyrille ALLERY demande pourquoi prendre en compte autant de modes. Johan CARLIER répond que la prise en compte de nombreux modes permet de mieux assimiler les premiers. Il répond également à Pierre COMTE et Christos VASSILICOS à propos de l'adjonction d'une viscosité artificielle. En fait, Cette viscosité est ajoutée en jouant sur certains coefficients du système pour permettre une première intégration directe. Elle disparaît ensuite car tous les coefficients du système dynamique s'ajustent sous la contrainte des observations.

Jacques Borée (LEA Poitiers) présente des mesures de pression de parois et des mesures LDV du champ de vitesse au-dessus d'un 'forward facing ramp' à 30 degrés. L'analyse est basée sur la POD. Il est montré que la densité spectrale de la partie corrélée montre toujours un pic dans le domaine de fréquence, lié au décollement des tourbillons tandis que la région à haute fréquence est dominée par la partie non-corrélée de la décomposition. La convergence rapide de la POD dans la région séparée de l'écoulement montre que cette méthode peut être employée pour obtenir un modèle réduit efficace pour le contrôle. Pour plus de détails : Hoarau, Borée, Laumonier, Gervais, Phys. fluids 18,055107 (2006).

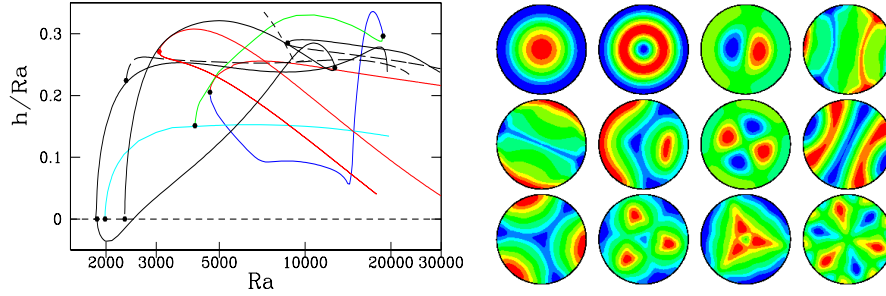


FIG. 2 – Diagramme de bifurcation (gauche) contenant 15 branches stationnaires.

1ère rangée (droite) : tore, deux tores, dipole, trois rouleaux.

2ème rangée (droite) : deux rouleaux, CO, pizza, quatre rouleaux.

3ème rangée (droite) : mercedes, trefle, mitsubishi, marguerite.

Pas montrés : tore, deux tores et deux rouleaux instables.

Laurette Tuckerman (PMMH-ESPCI) présente ses travaux communs avec Katarzyna Borońska (LIMSI-CNRS) sur la 'Multiplicité extrême de motifs convectifs'. Dans un cylindre rempli d'eau ($Pr = 6.7$) et ayant rayon deux fois la hauteur ($\Gamma \equiv R/H = 2$), Hof, Lucas et Mullin [Phys. Fluids **11**, 2815 (1999)] ont observé *cinq* motifs distincts différents au même nombre de Rayleigh, $Ra = 14\,200$: deux, trois et quatre rouleaux parallèles, un motif “mercedes” avec trois zones radiales de fluide descendant ou montant, et même un état axisymétrique. Ayant réussi à simuler ces motifs numériquement, nous avons cherché à construire un diagramme de bifurcation complet et, en particulier, de comprendre la relation entre ces motifs et les états créés à partir de l'état conductif, qui doivent obligatoirement être de nature trigonométrique.

Le diagramme, montré dans la figure 2, s'avère extrêmement riche, avec au moins 15 branches d'états stationnaires stables et instables, et au moins 2 branches d'états oscillatoires, liés entre eux par des bifurcations. Ce diagramme représente un compromis entre, d'un côté, les principes physiques régissant la convection dans l'intérieur, tels que la sélection de nombre d'onde, et de l'autre côté, les principes mathématiques de symétrie imposés par les frontières cylindriques du récipient.

Lionel Fabiane (PSA Peugeot Citroën - ENSTA) présente son sujet de thèse : Caractérisation analytique des structures tourbillonnaires contribuant aux forces aérodynamique. Il s'agit de déterminer le rôle des structures de l'écoulement au voisinage d'un obstacle et en particulier dans son sillage, puis de relier les structures cohérentes (les tourbillons) aux empreintes pariétales afin de mieux interpréter leur rôle dans la création des forces. Dans un premier temps on cherche une formulation analytique de ces forces et on étudie les résultats de simulations DNS 2D portant sur un cylindre à section carrée dans un écoulement à Reynolds modéré ($Re=100$).

Pierre Comte, (LEA, Poitiers) nous fait une séance biblio en directe. Ensemble on lit une publication sur le mystère du 'Rod-in-crossflow', Cavity resonance suppression using high frequency excitation : The mystery of the cylinder-in-crossflow revisited de Praveen Panickar et Ganesh Raman (AIAA 2008-2853).