

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 généralité 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.