

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.

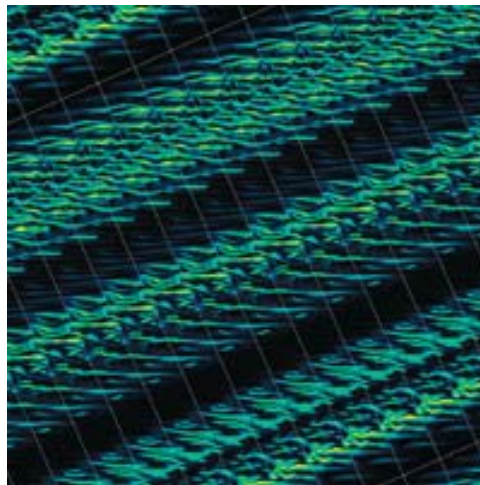
1) Bérengère Dubrulle débute par une présentation du problème de la simulation numérique des écoulements turbulents. On ne peut prendre en compte tous les degrés de liberté présents dans les écoulements astrophysiques, géophysiques, industriels ou même dans un grand nombre d'expériences de laboratoire. 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).

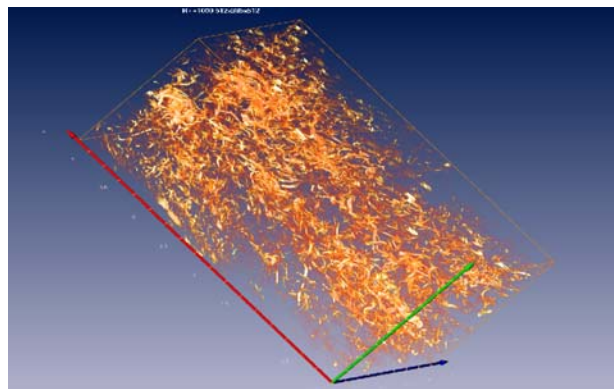
L. Tuckerman a simulé ces motifs numériquement en remplaçant les grandes dimensions latérales de l'expérience par un rectangle périodique incliné par rapport à la direction longitudinale. Une seule direction longitudinale suffit pour obtenir un motif de bandes ; l'autre direction transverse peut être 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.

