

Diffusion turbulente à travers une interface de densité : observations expérimentales et approche statistique.

L. Gostiaux^a, A. Venaille^b, J. Sommeria^c

a. Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, CNRS/École Centrale de Lyon

b. Laboratoire de Physique de l'École Normale Supérieure de Lyon

c. Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels, CNRS/Université de Grenoble

Résumé :

Nous présentons des mesures quantitatives de fluctuations de densité dans un fluide bi-couche mélangé par une grille oscillante. La turbulence produite par la grille localisée dans la couche inférieure dense diffuse rapidement dans cette couche puis est bloquée à l'interface entre le fluide dense et le fluide léger. La hauteur de l'interface augmente alors lentement en entraînant du fluide de la couche supérieure dans la couche inférieure. Nous proposons une méthode qui permet de séparer une partie ondulatoire d'une partie turbulente dans les fluctuations de densité à l'interface. Ces fluctuations sont observées par la méthode de fluorescence induite par un plan laser. Nous interprétons ces résultats à l'aide d'un modèle phénoménologique basé sur une approche statistique du mélange. Cela nous permet de discuter du rôle des fluctuations de densité dans les processus de mélange d'un fluide stratifié. Ces résultats peuvent permettre d'améliorer la modélisation des couches limites stratifiées dans l'océan et l'atmosphère pour les simulations numériques globales.

Abstract :

Using planar laser induced fluorescence, we present quantitative measurements of density fluctuations in a two-layer stably stratified fluid forced by an oscillating grid located at the bottom of the tank. The turbulence produced by the grid spreads rapidly in the lower layer and is blocked at the interface between the dense and the light fluid. The interface height increases then slowly by entraining some of the fluid of the upper layer in the turbulent layer. We propose a new method to separate the "wave" part from the "turbulent" part of the density fluctuations. We then discuss the role of these density fluctuations in the dynamics of the mixed layer depth.

Mots clefs : stratification ; mélange ; turbulence

1 Introduction

Les écoulements à grande échelle dans l'océan et l'atmosphère sont fortement influencés par la stratification, i.e. la variation de la densité avec la verticale. Par ailleurs, le profil vertical de densité est lui-même modifié par des épisodes de mélange turbulent à petite échelle, bien souvent en-dessous des échelles spatiales et temporelles des modèles climatiques et océaniques globaux. Ce mélange turbulent doit donc être étudié en détail afin de pouvoir proposer des modèles sous-maille les plus réalistes possibles.

Dans cette étude, nous travaillons sur un modèle idéalisé de couche de mélange (Figure 1, gauche). Une grille oscillante produit de la turbulence dans la couche inférieure d'un bi-couche stable (deux couches dont la densité diffère de $\Delta\rho$). La turbulence se propage rapidement dans la couche inférieure, mais est bloquée par le saut de densité. Alors, l'altitude moyenne de l'interface augmente lentement au fur et à mesure que du fluide léger est entraîné de la couche supérieure vers la couche inférieure.

Des études passées ont montré comment la dynamique de l'interface dépend de l'intensité de la turbulence et du profil de densité initial, voir les références dans la revue [1]. Nous allons nous concentrer sur le rôle des fluctuations locales de densité à l'interface, en lien avec un modèle statistique du mélange[3].

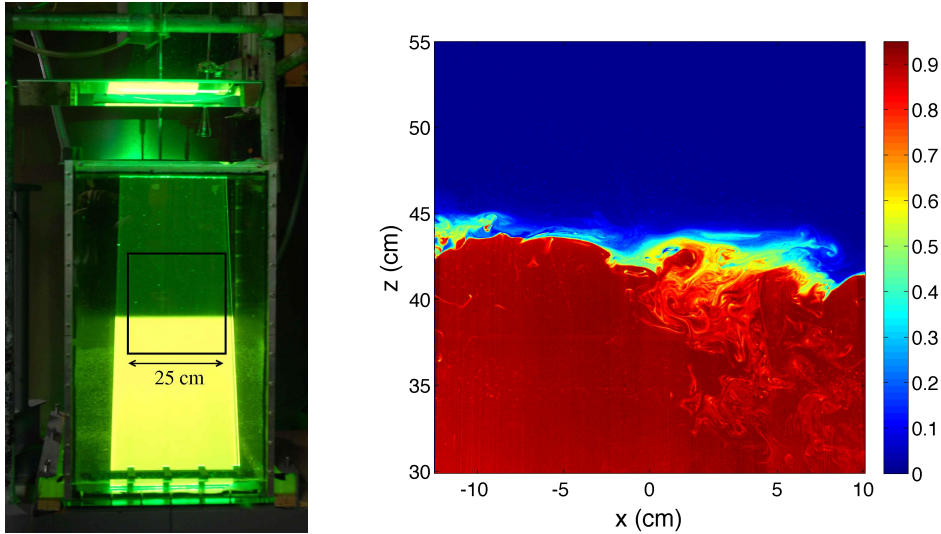


FIG. 1 – Gauche : Dispositif expérimental. La cuve, remplie en bas d'eau salée colorée à la rhodamine, et en haut d'un mélange eau-éthanol. La nappe LASER illumine la cuve en son centre, et le champ de vision de la camera est représentée par le carré de 25cm de côté. Droite : instantané du champ de densité, renormalisé entre 0 et 1. 0 : fluide léger. 1 : fluide dense. L'absorption de la lumière est aussi compensée, ainsi que la présence d'éventuels défauts dans la nappe LASER (bandes sombres dues à des bulles ou des poussières dans le trajet optique).

2 Protocole expérimental

Le dispositif expérimental utilisé est proche de celui de Rouse et Dodu[2]. Notre cuve a une section carrée de 40cm de côté, et est remplie jusqu'à $h_0 = 44$ cm de fluide dense, puis les 44cm restants sont constitués de fluide léger. Notre amélioration porte sur la technique de mesure. Nous utilisons une technique de Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF) avec compensation de l'indice optique entre les deux couches pour mesurer quantitativement des champs de densité. La couche inférieure est constituée d'eau salée colorée avec de la rhodamine. La couche supérieure est un mélange d'eau et d'éthanol, de même indice optique que la couche inférieure. La différence de densité $\Delta\rho$ entre les deux couches est imposée par les concentrations en sel et éthanol des deux fluides, et varie dans nos différentes expériences.

L'excitation est produite par une grille oscillante de pas 8cm, oscillant à 5Hz avec une amplitude pic à pic de 8cm. Le même forçage est utilisé pour toutes les expériences, et a été caractérisé par PIV dans une cuve remplie d'eau douce. Entre autres, des grandeurs comme l'échelle intégrale $L=10$ cm, proche du pas de la grille, et la variation exponentielle de l'énergie cinétique turbulente en fonction de z ont pu être mesurées.

Un champ instantané de densité est donné en exemple figure 1 (droite). Le champ mesure 25x25cm, et est centré 10cm au-dessus de l'interface au début de l'expérience, dans la partie centrale de la cuve. Une image est prise toutes les 10 secondes. On peut distinguer sur cet instantané, une structure à grande échelle ondulatoire, de type "sloshing", à laquelle se superposent les fluctuations à petite échelle dues à la turbulence. Nous avons pu séparer la partie ondulatoire, définie par les variations à grande échelle de l'interface $h(x, t)$, et la partie turbulente utilisée pour construire les densités de probabilités $p(\sigma, \zeta, t)$ où σ est la densité et ζ la distance à l'interface précédemment définie h .

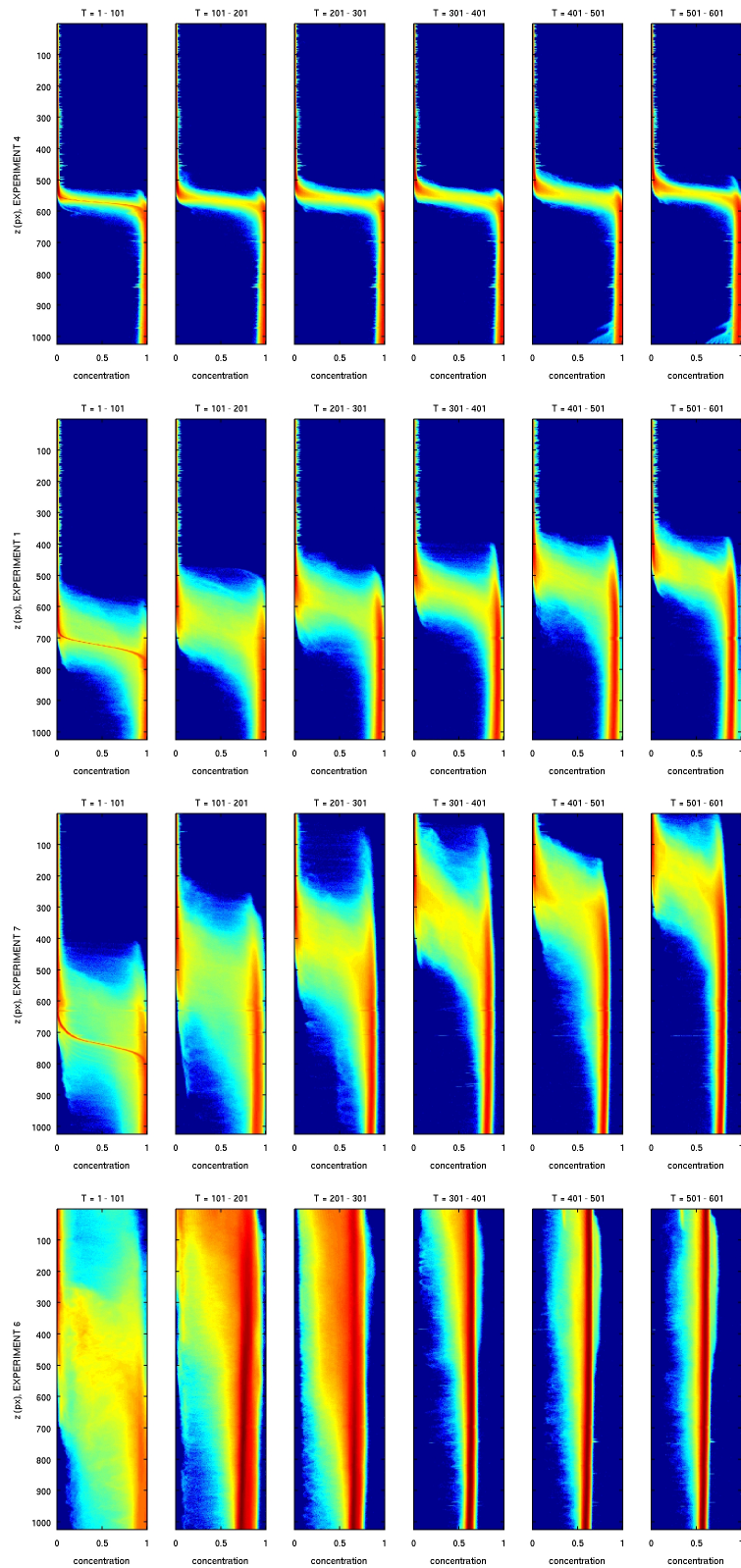


FIG. 2 – Évolution de la pdf de la densité cumulée sur 100 images successives, par tranches de 100 images, et pour 4 expériences différentes. En ordonnée, l'échelle verticale (en pixels). En abscisse la densité (normalisée), de 0 (fluide léger) à 1 (fluide dense). La couleur représente la valeur de la pdf. $\Delta\rho$ diminue de haut en bas.

Expérience	1	2	3	4	5	6	7
$\Delta\rho$ (%)	0.33	0.3	0.8	1.3	0.01	0.04	0.11

TAB. 1 – Paramètres des différentes expériences

3 Résultats et perspectives

L'ensemble des champs de densité ont été analysés en termes de PDF de la concentration. Dans toutes les expériences, les concentrations sont re-normalisées à 1 dans la partie inférieure, et à 0 dans la partie supérieure. Les PDF sont réalisées à chaque altitude, si bien que la PDF est piquée à 1 en bas de l'image, à 0 en haut, et s'étale graduellement dans la zone de mélange. La figure 2 présente pour 4 expériences différentes, les PDF cumulées sur 100 images successives (soit 1000 secondes), par tranche de 100 images (soit successivement, de gauche à droite, le cumul des images 1-100, 101-200, 201-300, etc.). De haut en bas, le seul paramètre qui change est la différence de densité $\Delta\rho$ qui va en diminuant. On reconnaît bien, tout d'abord les pics à $\sigma = 1$ et $\sigma = 0$ respectivement en bas et en haut de chaque diagramme. On notera que le pic à $\sigma = 0$ ne varie pas au cours des expériences, alors que le pic à $\sigma = 1$ diminue progressivement, ce qui traduit que le mélange se fait par absorption du fluide léger par le fluide dense.

Un paramètre clef de ce problème est le nombre de Richardson, défini comme le rapport de l'énergie potentielle associée à l'interface à l'énergie cinétique turbulente. Nous montrons que la forme de la PDF de densité peut être expliquée par un modèle de physique statistique[3], pour lequel les profils de densité moyen sont en tanh. Les données de toutes les expériences, et à tous les temps, semblent obéir à cette loi (Figure 3). Nous pouvons en déduire l'existence de deux régimes suivant la valeur du Ri.

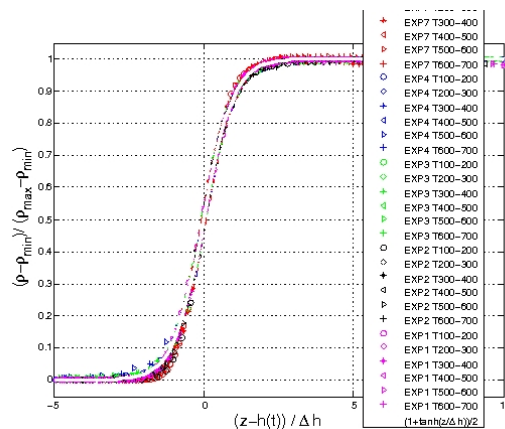


FIG. 3 – Adéquation de l'ensemble des profils moyens de densité avec le profil en tanh issu de l'approche statistique du mélange.

Les résultats sont actuellement en cours d'analyse. Nous présenterons l'évolution de la vitesse d'entraînement avec le Richardson, et comment la filamentation dans la couche inférieure disymétrise la PDF des concentrations.

Références

- [1] H. J.S. . Fernando. Turbulent Mixing in Stratified Fluids. *Annual Review of Fluid Mechanics* **23** : 455–493, 1991.
- [2] H. Rouse and J. Dodu, Diffusion Turbulente à travers une discontinuité de densité. *La houille blanche* **4** : 522–532, 1955.
- [3] A. Venaille and J. Sommeria. A dynamical equation for the distribution of a scalar advected by turbulence. *Physics of Fluids* **19** : 028101, 2007.