

## Proposition de stage M2

### Mélange de traceurs passifs par les cisaillements stratifiés

Laboratoire proposant : Laboratoire d'Aérodynamique/Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS)

#### Encadrants

Francis Auclair, 05 61 33 27 75, [francis.auclair@aero.obs-mip.fr](mailto:francis.auclair@aero.obs-mip.fr)  
Yves Morel, 05 61 33 30 55, [yves.morel@legos.obs-mip.fr](mailto:yves.morel@legos.obs-mip.fr)

#### Collaborations

Jared Penney, 05 61 33 29 72, [jared.penney@legos.obs-mip.fr](mailto:jared.penney@legos.obs-mip.fr)  
Peter Haynes, 05 61 33 46 28, [peter.haynes@legos.obs-mip.fr](mailto:peter.haynes@legos.obs-mip.fr)

#### Compétences requises

Formation en océanographie physique ou mécanique des fluides de niveau master  
Bon niveau de logiciels type MATLAB (et/ou Python), FORTRAN, C++  
Bon niveau en mathématiques et analyse numérique, anglais (lecture d'articles scientifiques).

#### **Contexte**

Ce stage se place dans la suite du projet TEASAO (Turbulence effect on active species in atmosphere and ocean).

Le contexte du projet TEASAO visait la préparation de la prochaine génération de modèles à très haute résolution, en particulier pour l'océan. Pour cela, l'un des défis scientifiques majeurs est d'améliorer la compréhension et la modélisation de l'effet de la turbulence à petite échelle et du mélange vertical sur l'évolution des espèces chimiques ou biologiques dans l'océan. En effet, ces processus sont la clé de notre capacité à comprendre, modéliser et prévoir l'évolution des ressources, la qualité de l'eau, le développement et la dispersion de certains polluants, la production primaire (plancton) et l'évolution des ressources (pêche) dans l'océan, ... qui représentent des problèmes de société importants pour une gestion et une exploitation durable de l'environnement.

Le sujet de stage est construit sur la base d'une approche combinant théorie et numérique. Un objectif scientifique est de construire un cadre simple pour étudier les aspects théoriques de l'évolution de traceurs passifs, actifs et réactifs dans des écoulements turbulents stratifiés, en particulier l'évolution de leur distribution selon les classes de densité.

#### **Mots-clés**

Etude des effets du mélange  
Cisaillement stratifié  
Instabilités de Kelvin-Helmholtz  
Etude académique sur des cas tests simplifiés

## Objectifs et description du stage

Pour ce sujet, nous nous concentrons sur **la dynamique des traceurs passifs ou actifs** et leur évolution lors d'une évolution diabatique, c'est-à-dire la naissance d'une instabilité menant à une cascade turbulente jusqu'aux échelles dissipatives. Nous nous intéressons à des configurations stratifiées et aux flux diapycnaux des traceurs, c'est-à-dire à la capacité du mélange à redistribuer le traceur dans d'autres gammes de densité. Le mécanisme choisi est l'instabilité de Kelvin-Helmoltz, qui se déclenche en présence de courants fortement cisailés verticalement.

Nos études théoriques et numériques avec des traceurs passifs ont permis de montrer qu'il existe des **contraintes fortes sur l'évolution des traceurs : le mélange engendre une simplification des interdépendances entre traceurs, qui deviennent linéaires** (Voir Fig. dessous: le diagramme de dispersion densité/traceur converge vers une forme linéaire par morceaux). Nous avons montré que cela **contraint tous les traceurs à avoir une diffusivité turbulente macroscopique égale** et à pouvoir être tous entièrement déterminés à partir de la connaissance d'un seul traceur. Ce résultat théorique majeur est lié à certaines propriétés de l'écoulement et des traceurs, en particulier leurs caractéristiques de diffusivité moléculaire. **Ces expériences mettent en évidence comment des propriétés à échelle moléculaire peuvent avoir des répercussions majeures à échelle macroscopique.**

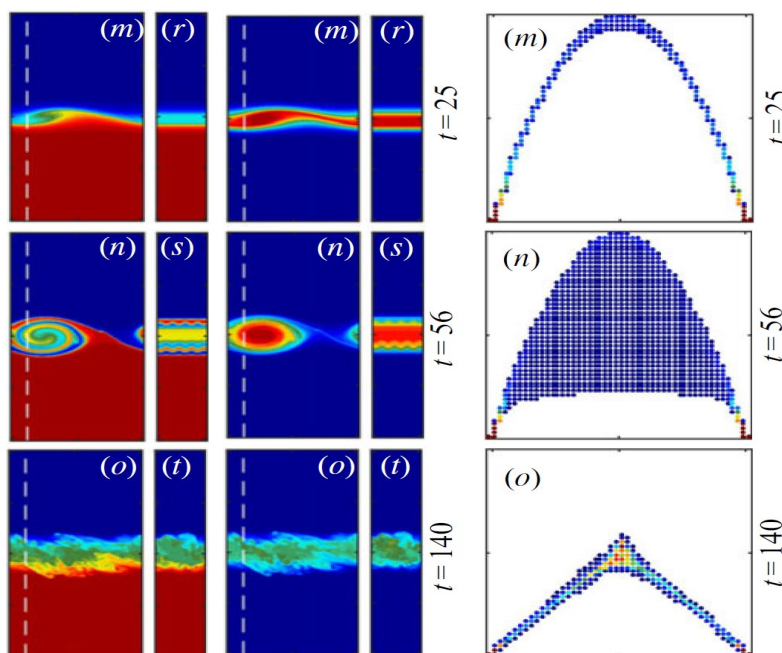


Fig. : Coupe verticale de densité (à gauche, vue dans le plan du courant initial m-n-o, et dans le plan transverse, r-s-t) et d'un traceur passif (au centre) lors du développement d'une instabilité de Kelvin-Helmoltz générant une cascade turbulente et du mélange.

La courbe de droite représente l'évolution du diagramme de dispersion traceur/densité. Noter la forte dispersion au démarrage de la phase instable puis la reconcentration vers un profil linéaire par morceaux pendant la phase turbulente.

D'après Penney et al, 2020.

Pour le stage proposé, il s'agira de reprendre ces configurations simplifiées et d'étudier les effets d'une diffusion moléculaire différente entre traceurs et densité. En effet, les résultats précédent ont été établis dans le cas précis d'égalité des diffusivité moléculaire et nous pensons qu'en cas d'écart substantiel, les résultats seront différents, permettant notamment, dans certains cas de figure qui restent à identifier, la pénétration de traceurs dans des gammes particulières de densité. En particulier, la plupart des études sur les instabilités Kelvin-Helmoltz en milieu stratifié, une stratification symétrique, correspondant également à la couche de cisaillement de vitesse prescrite, est généralement supposée. Dans la nature, notamment dans les couches limites océaniques ou atmosphériques, il existe des cas

asymétriques (stratifications ou profil de courants asymétriques) et nous étudierons l'impact que cela peut avoir sur la redistribution de traceurs ayant des diffusivité différentes.

Ce sujet doit nous permettre d'apporter quelques explications à la structuration verticale de certains traceurs, notamment biogéochimiques, dans la couche de mélange.

Les traceurs seront, au moins dans un premier temps, considérés comme passifs, mais le cas de traceurs actifs (agissant sur la densité, mais non réactifs) pourra être considéré.

La modélisation utilisera le code non-hydrostatique CROCO-NH (<https://www.croco-ocean.org/>), les expériences numériques seront réalisées sur des supercalculateurs parallèle (mais aucune compétence en programmation parallèle n'est nécessaire pour ce stage).

### **Planning indicatif**

- 1- Etude bibliographique initiale. Appropriation de la problématique, de la méthodologie, et des modèles fournis ( $\approx$  3 à 4 semaines)
- 2- Proposition des configurations et des diagnostics à effectuer ( $\approx$  2 à 3 semaines)
- 3- Mise en oeuvre informatique, réalisation des expériences numériques et des diagnostics ( $\approx$  12 à 16 semaines)
- 4- Rédaction du rapport et présentation des résultats ( $\approx$  3 à 4 semaines)

Ce stage doit se dérouler sur une **durée de 5 à 6 mois**.

### **Références**

J. Penney, Y. Morel, P. Haynes, F. Auclair and C. Nguyen, 2020. Diapycnal mixing of passive tracers by Kelvin-Helmholtz instabilities. J. Fluid Mech., 900, A26, doi:10.1017/jfm.2020.483