

**ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT
D'ILE DE France N° 129**

Proposition de sujet de thèse pour la rentrée 2025

Nom du Laboratoire d'accueil : LMD

N° UMR : 8539

Nom du Directeur du laboratoire : Freddy Bouchet

Adresse mail : freddy.bouchet@lmd.ipsl.fr

Nom de l'Equipe d'accueil : DPA

Nom et prénom du Directeur de thèse **HDR** : **LAPEYRE Guillaume**

Pourcentage d'encadrement (minimum 50%) : 50 %

Adresse mail : guillaume.lapeyre@lmd.ipsl.fr

Nom et prénom du co-directeur de thèse **HDR** : BERTI Stefano

Pourcentage d'encadrement : 50 %

Adresse mail : stefano.berti@polytech-lille.fr

- **Titre de la thèse en Français : Dispersion de traceurs dans l'océan global**
- **Titre de la thèse en Anglais : Tracer dispersion in the global ocean**

• Résumé Sujet en Français (1 page maximum) :

Les tourbillons océaniques à mésoéchelle ($O(100)$ km) contiennent la plus grande partie de l'énergie cinétique dans l'océan. La sous-mésoéchelle (échelles inférieures à $O(10)$ km), en revanche, se manifeste par des tourbillons plus petits et plus rapides, ainsi que des filaments et des fronts (par ex. de température) et est importante à la fois par les transports verticaux intenses de traceurs qu'elle induit que par son rôle dans les transferts d'énergie entre échelles [Lapeyre & Klein, 2009]. L'observation des caractéristiques fines de l'océan de surface à l'échelle planétaire est désormais possible grâce au satellite SWOT qui mesure la hauteur de la mer (SSH) avec une résolution effective inégalée de 6km [Fu et al. 2024]. L'innovation apportée par cet instrument suggère la possibilité d'une vision globale des propriétés de transport de traceurs à fine échelle dans l'océan. Cela soulève néanmoins de nouveaux défis scientifiques en relation avec l'interprétation de ces données. En effet, la SSH ne fournit qu'une estimation des *courants eulériens* à travers l'équilibre géostrophique, équilibre pas forcément valide à fine échelle. De plus, les vitesses géostrophiques sont non-divergentes par construction et ne permettent donc pas de détecter et quantifier l'accumulation de matériaux particuliers (tels les polluants ou des débris plastiques) à la surface de l'océan.

Les approches *lagrangiennes* pour aborder ces questions sont complémentaires car elles intègrent le signal dans le temps le long des trajectoires des particules fluides. En particulier, on peut tester l'accord entre les régimes de dispersion de flotteurs observés et les prédictions issues de la théorie de la turbulence quasi-géostrophique à mésoéchelle [Foussard et al. 2017, Maalouly et al. 2023]. Les écarts à ces prédictions vont alors fournir des informations sur l'interaction entre les processus rapides non-géostrophiques (type ondes internes), non résolus par le satellite, et les processus géostrophiques plus lents.

Cette thèse, qui s'inscrit dans un projet plus large associé à SWOT, a pour but d'étudier *l'effet des mouvements non-géostrophiques sur les propriétés de dispersion de traceurs à l'échelle globale*. A partir d'une simulation numérique réaliste de dernière génération (LC4320 JPL/NASA) et au moyen d'outils statistiques lagrangiens provenant des théories de la turbulence dans des fluides, on déterminera la variabilité géographique et saisonnière du transport et de la dispersion à la surface de l'océan. On examinera l'impact des mouvements non-géostrophiques à travers différentes techniques de filtrage des champs de vitesses advectant les traceurs. Une attention particulière sera portée au phénomène d'agglomération de particules induit par ces mouvements, récemment mis en évidence par des bouées de surface [D'Asaro et al., 2018], mais dont les mécanismes ne sont pas encore complètement compris. Pour ce faire, on s'appuiera sur une méthodologie lagrangienne que nous venons de développer [Maalouly et al. 2024] et sur des développements théoriques récents concernant les statistiques eulériennes des gradients de vitesse en turbulence compressible que l'on essaiera d'étendre au cadre lagrangien. Cette approche devrait permettre de mieux comprendre les mécanismes physiques contrôlant les processus d'agglomération de particules. *L'objectif final est d'évaluer le degré de précision (en termes d'échelles spatiales) avec lequel les vitesses fournies par SWOT représentent les vitesses réelles à la surface de l'océan, ainsi que leurs propriétés turbulentes*. Un développement possible de ce travail serait d'appliquer les résultats obtenus aux données SWOT en lien avec les données de bouées dérivantes.

Le travail de thèse sera effectué au LMD (à l'ENS, Paris) sous la direction de Guillaume Lapeyre avec une co-direction de Stefano Berti (UML, Lille). Ce travail bénéficiera aussi d'une collaboration avec le LOPS-IFREMER, Brest, aussi impliqué dans le projet CNES "Data and dynamical synergies for SWOT - B" et plus généralement dans l'équipe scientifique internationale de SWOT.

• **Résumé Sujet en Anglais (1 page maximum) :**

Ocean mesoscale motions (scales of the order $O(100)$ km) correspond to vortices with weekly time scales and contain most of the ocean kinetic energy. Submesoscale flows (scales below $O(10)$ km), on the other hand, correspond to smaller and faster eddies, filaments and fronts (e.g. of temperature), which are important both for the intense vertical transport of tracers they induce and for their role in the energy transfers across scales [Lapeyre & Klein 2009]. Observing fine features of surface-ocean flows at the planetary scale has now become possible thanks to the satellite SWOT, which provides sea surface height (SSH) data at an unprecedented effective resolution of 6 km [Fu et al. 2024]. The innovation brought by this instrument suggests the possibility to characterize the fine-scale properties of tracer transport in the ocean. However, it also raises important scientific challenges related to the interpretation of these new data. Indeed, *Eulerian* velocities are typically estimated from SSH through geostrophic equilibrium, which is not granted to hold at fine scales. In addition, geostrophic motions are nondivergent by construction and, thus, do not allow to detect and quantify the accumulation of particulate materials (such as pollutants or plastic debris) at the surface of the ocean.

Lagrangian approaches can help shed light on these questions, as they reflect the temporal evolution of fluid parcels in the flow and hence sample processes acting on different timescales. For example, particle dispersion regimes can be predicted from quasi-geostrophic turbulence theory [Foussard et al. 2017, Maalouly et al. 2023]. Deviations from these laws can provide information on the interaction between fast non-geostrophic processes (such as internal waves), not directly resolved by the satellite, and slower geostrophic ones.

In this thesis, part of a wider research project on SWOT, *we will explore the effect of non-geostrophic motions on the properties of tracer dispersion on a global scale*. Using a state-of-the-art, high-resolution global-ocean numerical simulations (LC4320 JPL/NASA) and through different statistical Lagrangian indicators, we will examine the geographical and seasonal variability of transport and dispersion at the ocean surface. The impact of non-geostrophic motions will be addressed through different filtering strategies of the velocities advecting the tracers. Particular attention will be paid to the phenomenon of particle clustering, caused by these motions and recently highlighted by real surface drifters [D'Asaro et al., 2018], but whose mechanisms are not yet fully understood. This point will be examined relying on a Lagrangian methodology that we previously developed [Maalouly et al. 2024]. We will also take profit on recent theoretical advancements on the Eulerian statistics of velocity gradients in compressible turbulence and try to extend their scope to the Lagrangian framework. Through this approach we expect to gain insight into the physical processes controlling clustering. *The broader aim of the work planned is to assess to what degree of accuracy (in terms of spatial scales) SWOT-derived velocity fields represent real surface-ocean currents, and their turbulent properties*. It will then be possible to extend the analysis to compare experimental data from SWOT and from drifting buoys.

The PhD thesis will be conducted at LMD-ENS (Paris) under the supervision of Guillaume Lapeyre and the co-supervision of Stefano Berti (UML, Lille). It will also benefit of a collaboration with LOPS - Ifremer, Brest, involved in the CNES project "Data and dynamical synergies for SWOT - B" and, more generally, the international SWOT Science Team.

• **Autre type de financement demandé, précisez date de demande ou si déjà acquis (CNES, CEA, ADEME, ANR, Région etc...) :**

• **Encadrement :**

. **Liste des doctorant.es que vous encadrez ou co-encadrez au 1^{er} janvier 2025**

(Nom, Université d'inscription, type de financement, date de soutenance envisagée)

Pour Guillaume Lapeyre :

Mohamed Kaouah, Sorbonne Université, CNES+SU, 31 mars 2025, encadré à 50 %.

Félix Vivant, Université PSL, CDSN Paris Saclay, 31 août 2027, encadré à 100 %.

Pour Stefano Berti :

Luz Andrea Silva Torres, Université de Lille, CD Univ. Lille, 30 septembre 2026, encadrée à 50%.

Zhongxuan Hou, ENSAM Lille, CSC (Chine), 30 septembre 2027, encadré à 30%.