

## PROPOSITION DE SUJET DE THESE

### 1. FICHE SYNTHETIQUE

- **Titre du sujet de thèse proposé** : Séparation des mouvements quasi-géostrophiques et des ondes internes pour l'observation satellite haute résolution de l'Océan

- **Directeur de thèse** : Xavier Carton

- **Co-directeur de thèse** : Aurélien PONTE

- **Laboratoire/unité, département d'accueil** : LOPS

- **Ecole doctorale de rattachement** : Ecole Doctorale des Sciences de la Mer (Brest)

- **Cofinancement envisagé/obtenu** : ANR EQUINOx (obtenu)

- **Employeur envisagé** : Ifremer

- **Résumé et mots-clés en français (15 lignes)** :

Nous disposerons prochainement d'une richesse de données altimétriques sans précédent (jusqu'à 6 altimètres volant simultanément) ainsi que d'un nouvel instrument (SWOT, lancement prévu pour 2021) qui va révolutionner notre capacité à cartographier le niveau de la mer et la circulation océanique de fine échelle (<100km). Le bond technologique associé à SWOT est mis en péril par une difficulté nouvelle résultant de la superposition de signaux associés à deux classes de processus distincts : les tourbillons, fronts et filaments mésoéchelle et sous-mésoéchelle (M/SM) d'un côté et les ondes internes (OI) de l'autre.

La question centrale adressée par ce projet de thèse est celle de notre capacité à distinguer la signature de la M/SM et des OI dans les données océanographiques (satellite, in situ). La réponse à cette question nécessitera de quantifier la capacité prédictive des modèles dynamiques prédisant l'évolution de ces processus, d'identifier la nature et l'impact des interactions entre M/SM et OI sur leurs évolutions respectives et d'explorer de nouvelles synergies entre différentes observations. Des approches numériques idéalisées et réalistes ainsi que des développements théoriques seront employés afin de répondre à ces questions.

Le projet s'inscrit dans le cadre du projet EQUINOx (ANR JCJC portée par A. Ponte) et va venir appuyer les efforts de l'Ifremer dans le soutien au développement de la mission SWOT.

- **Titre, résumé et mots-clés en anglais**, pour affichage sur les sites internationaux (voir commentaires ci-dessus).

Title: DisEntangling Quasi-geostrophic motions and INternal waves in high resolution satellite observations of the Ocean

Summary:

The incoming years will see an unprecedented wealth in altimetric data (up to 6 satellite flying at one time) and the emergence of a new instrument (SWOT) that will revolutionize our ability to map ocean sea level and currents at fine scales (<100km). The SWOT technological breakthrough is however jeopardized by a novel issue, identified as priority to be addressed by the mission science team, which results from the superimpositions of two different signals: slow Mesoscale eddies and SubMesoscale front and filaments (M/SM) on one hand and fast Internal Gravity Waves (IGW) on the other hand.

The central issue addressed by the thesis project is that of our ability to distinguish the signature M/SM and IGW in oceanographic data (satellite, in situ). Answering this question will require to quantify the predictive ability of dynamical models governing evolution of these processes, to identify the nature and impact of interactions between M/SM and OI on their respective evolutions, and, to explore new data synergies. Idealized and realistic numerical modelling as well as theoretical approaches will be employed in order to address these issues.

This PhD project is part of the ANR funded EQUINOx project and will strengthen Ifremer's efforts in supporting the development of the SWOT mission.

- **Profil de candidature souhaitée**

Master 2 en océanographie physique ou météorologie dynamique. Intérêt pour la dynamique des fluides géophysiques, la modélisation numérique et/ou les méthodes inverses. Programmation avec les langages scientifiques (Python, Fortran en particulier). Forte motivation, capacité à travailler en équipe.

Master in physical oceanography or dynamical atmospheric sciences. Interest for geophysical fluid dynamics, numerical modelling and inverse problems. Programming skills (Python, Fortran in particular). Strong motivation and ability to work in teams.

## 2. PROGRAMME DE RECHERCHE DETAILLE

### 2.1. Exposé du projet :

#### Contexte

L'étude de la circulation océanique de petite échelle est au premier plan de l'océanographie moderne [Ferrari Science 2011, Callies et al. Nat. Commun. 2015]. Cette circulation est composée des Ondes Internes (OI, périodes <1 jour et échelles horizontales <300km) et de mouvements plus lents dits quasigéostrophiques. Ces derniers sont composés des tourbillons mésoéchelles (échelles horizontales comprises entre 50 et 300km, et périodes de plusieurs semaines) et des fronts et filaments de sous-mésoéchelle (échelles horizontales inférieures à 50km et périodes de 1 jour à 1 semaine). La circulation Mésoéchelle et Sous-Mésoéchelle (M/SM), de par son énergie et sa capacité à déplacer et redistribuer horizontalement et verticalement la chaleur, le sel, le carbone et les nutriments, joue un rôle essentiel pour le fonctionnement physique et biogéochimique de l'océan y compris sur les échelles de temps climatiques [McWilliams 2008, Klein and Lapeyre Annu. Rev. Mar. Sci. 2009, Omand et al. 2015, Griffies et al. 2015, Gnanadesikan et al. 2015, Serazin et al. 2016, Farneti et al. 2016, Gent 2016]. Les simulations numériques de haute résolution nous ont permis une exploration intensive de la dynamique des processus de M/SM et de leur impact sur les systèmes océaniques et climatiques. **Il est maintenant critique de valider ces résultats numériques.** Les observations satellite de la surface de l'océan (élévation, température, rugosité, et plus récemment, salinité) atteignent des résolutions spatiales suffisantes afin de capturer M/SM et potentiellement valider les résultats numériques. Deux missions altimétriques de haute résolution (SWOT, Sentinel3) ont, par exemple, été initiées afin d'atteindre cet objectif spécifique. L'interprétation des données altimétriques collectées par les missions SWOT et Sentinel3 est rendue difficile par **la coexistence entre M/SM et OI** (Figure 1) et l'identification de leurs signatures respectives qui est nécessaire afin d'estimer correctement l'état de l'océan. L'importance de ce problème scientifique a été souligné par deux publications récentes au sein de la mission SWOT et un corpus grandissant de publications scientifiques [Arbic et al. 2015, Klein et al. 2015, Rocha et al. 2016]. La séparation entre signature M/SM et OI dans les données satellite est un problème délicat en général du fait du faible échantillonnage temporel de ce type d'observation qui exclut l'utilisation de filtres temporels. L'ANR EQUINOX dans lequel ce projet de thèse s'inscrit vise à **développer de méthodes nouvelles** permettant de combiner différentes données satellite (niveau de la mer et température de surface en particulier) ainsi que des informations dynamiques et statistiques afin d'opérer cette séparation entre M/SM et OI.

#### Questions scientifiques

La question centrale adressée par ce projet de thèse est celle de notre capacité à distinguer la signature de la M/SM et des OI dans les données océanographiques (satellite, in situ). La réponse à cette question nécessitera non seulement de quantifier la capacité prédictive des modèles dynamiques prédisant l'évolution de ces processus mais également d'identifier la nature et l'impact des interactions entre M/SM et OI sur leurs évolutions respectives.

#### Intérêt

Il y a actuellement un double intérêt à améliorer notre capacité à distinguer M/SM et OI dans les données. Un **intérêt fondamental** d'abord car nous devons améliorer notre compréhension de la dynamique de ces processus et de leurs interactions mutuelles, ainsi que leurs distributions

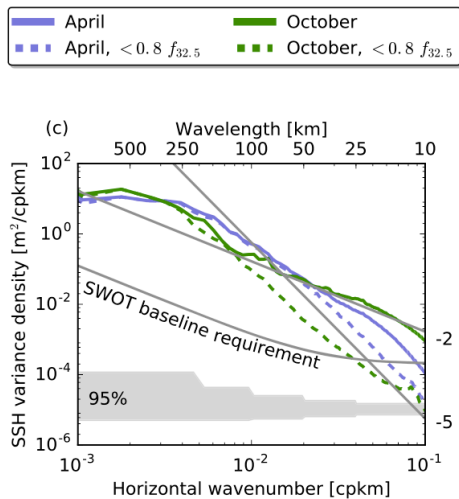


Figure 1. Averaged amplitude of sea level (full lines) and of M/SM contribution to sea level (dashed lines) as a function of wavenumbers (wavelengths are indicated on top) in the Kuroshio extension region [Rocha et al. 2016]. The difference between the two spectra are attributed to IGW. These spectra are shown for two months and illustrate seasonal variations of the relative amplitudes of M/SM and IGW signatures on sea level. In October, IGW dominate at all scales smaller than about 100km. These results were obtained from a high resolution global numerical simulation that is further described in the caption of Figure 4. The SWOT baseline requirement indicates that the SWOT measurement will be accurate enough in order to resolve these motions.

spatio-temporelle et géographique. Il y a également un **intérêt opérationnel** car la superposition de ces processus limite notre capacité à estimer la circulation océanique aux échelles <100km. Or ces échelles sont celles qui ont un impact significatif sur les flux de traceurs (dans la direction verticale en particulier) et sur la vie marine.

Ce projet de thèse s'inscrit dans le cadre de la mission de l'Ifremer visant à améliorer notre connaissance du fonctionnement de l'Océan mais vient également appuyer le soutien de l'Ifremer au développement de la mission SWOT.

### Originalité

Le sujet de la séparation entre signaux de M/SM et d'OI dans les données satellites est un sujet de recherche de premier plan en océanographie physique du fait notamment du contexte altimétrique (SWOT).

### Méthode

L'approche considérée pour cette thèse est elle aussi originale avec une combinaison d'outils numériques de réalisme variable, d'outils théoriques (permettant de définir et de dériver les lois d'évolutions des processus de M/SM et d'OI), et, d'outils statistiques (méthode inverses).

### Echéancier

Le déroulement de la thèse va s'articuler autour de deux axes :

1/ (approx. 1.5 an) Estimation de la capacité prédictive de modèles dynamiques prédisant l'évolution des processus de M/SM et d'OI.

Cet axe va nécessiter d'affiner des modèles existants au moyen de développement théoriques et de quantifier leur capacité prédictive. Les interactions entre M/SM et OI seront caractérisées et quantifiées.

2/ (approx. 1.5 an) Utilisation d'un système simplifié d'assimilation et test dans une situation idéalisée.

Des outils existants de séparation des processus de M/SM et d'OI seront étendus afin d'objectivement équilibrer les observations (incertitude, échantillonnage) et les contraintes dynamiques.

Chacun de ces axes devrait naturellement mener à une publication. Ces publications constitueront le cœur du manuscrit de thèse. Trois mois seront réservés à la rédaction des parties complémentaires (introduction, conclusion, chapitres complémentaires).

### Application/impact

EQUINOx et ce projet de thèse vont avoir un impact d'ordre fondamental sur notre compréhension de la dynamique et la prévisibilité des processus de M/SM et d'OI. Ce projet de thèse va également améliorer notre capacité à distinguer les signatures de ces deux types de processus dans les observations satellite (SWOT en particulier) et in situ, ce qui représente un impact positif sur le plan opérationnel. D'un point de vue méthodologique, le développement

d'un système d'assimilation permettant la distinction entre processus va avoir un impact notable.

### **Contexte collaboratif, partenariat**

En tant que membre actif du projet EQUINOx, l'étudiant va être amené à interagir avec des chercheurs de laboratoires/entreprises/instituts nationaux (LMD, LGGE, CLS, CNES) ainsi qu'internationaux (Scripps, Courant Institute).

## 3. ENCADREMENT SCIENTIFIQUE

**3.1.** Proposant du sujet / responsable scientifique de la thèse :  
(s'il n'est pas le Directeur de la thèse, il sera le co-directeur)

- **Nom, prénom** : Ponte, Aurélien
- **Fonction et spécialité à l'Ifremer** : chercheur (LOPS-OSI)
- **Diplôme le plus élevé obtenu** : Thèse
- **Centre Ifremer de** : Brest
- **Département** : ODE
- **Unité de recherche/Laboratoire** : LOPS
- Tél.** : 02 98 22 40 73 **Mel** : aurelien.ponte@ifremer.fr

**3.2.** Directeur de la thèse (ayant une HDR ou un Doctorat d'Etat) :  
si différent du responsable scientifique

- **Nom, prénom** : Carton, Xavier
- **Fonction et spécialité** : professeur UBO
- **Diplôme (HDR ou Doctorat d'Etat)** : HDR UBO 1999
- **Ecole doctorale de rattachement** : EDSML
- **Adresse** : LOPS, IUEM/UBO, Rue Dumont D'Urville, 29280 Plouzane
- **Tél.** : 02 90 91 55 09 **Mel** : xcarton@univ-brest.fr

**3.3.** Expérience d'encadrements d'étudiants :

**- Nom des doctorants dirigés antérieurement (*bourses Ifremer et autres*) sur les 7 dernières années; Sujet et date de soutenance de thèse; Situation professionnelle actuelle (*si connue*) :**

Xavier Perrot, doctorat UBO (interactions de tourbillons en environnement variable), 27 Septembre 2010, assistant de recherche LMD/ENS, Paris

Thomas Meunier, doctorat UBO (dynamique des courants d'upwelling et influence de la topographie), 14 Juin 2011 (co-direction avec Des Barton et Yves Morel), assistant de recherche CICESE, Mexique.

Gabriel Dulaquais, doctorat UBO (cycle du cobalt en Atlantique nord et en Méditerranée), 21 Novembre 2014 (co-direction mineure ; principale encadrante : Marie Boyé), assistant de recherche UBO. \\\

Pierre L'Hegaret, doctorat UBO (dynamique de l'outflow persique en mer d'Arabie), 3 mars 2015 (co-direction avec Remy Baraille), post-doctorat RSMAS (Miami, USA).

Clément Vic, doctorat UBO (dynamique de méso échelle et sous méso échelle en mer d'Arabie), 12 Novembre 2015 (co-direction avec Guillaume Roulet et Xavier Capet), post-doctorat NOCS (Southampton, UK).

Moussa Omar Youssouf (circulation, masses d'eau et biogéochimie du golfe de Tadjourah, Djibouti), doctorat UBO, 23 mars 2016 (co-direction avec Laurent Memery), chercheur CERD, Djibouti.

Daniele Ciani (interaction et signature en surface de tourbillons intra-thermocline), doctorat UBO, 26 Octobre 2016 (co-direction avec Bertrand Chapron), post-doctorat CNR (Rome, Italie).

### **Thèses devant être soutenues avant mars 2018**

Tonia Astrid Capuano (dynamique de méso échelle et sous méso échelle dans la région des Aiguilles et impact sur l'AAIW), doctorat UBO, soutenance programmée en Décembre 2017 (co-direction avec Sabrina Speich, LMD/ENS – encadrement 1/3).

Emeric Baquet (ondes internes solitaires du golfe de Guinée), doctorat UBO, soutenance programmée en Février 2018 (co-direction avec Annick Pichon, HOM/SHOM et Stéphane Raynaud, ACTIMAR– encadrement 1/3).

**Thèses en cours**

Mathieu Morvan (dynamique de sous méso échelle des outflows en mer d'Arabie), soutenance de doctorat UBO, prévue en Septembre 2019 (encadrement 100%).

Adam Ayouche (observabilité de surface et mélange vertical liés à la sous méso échelle en milieu côtier: application au golfe de Gascogne), soutenance de doctorat UBO, prévue en Septembre 2020 (co-direction avec Guillaume Charria et Nadia Ayoub – encadrement 1/3).