

**ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT**  
**D'ILE DE France N° 129**  
**Proposition de sujet de thèse pour la rentrée 2020**

**Nom du Laboratoire d'accueil :** LOCEAN

N° UMR : 7159

**Nom du Directeur du laboratoire :** Jean-Benoit Charassin

**Adresse complète du laboratoire :** LOCEAN UMR 7159, Université Pierre et Marie Curie, 4 place Jussieu, BP 100, 75252 Paris Cedex 05 Paris, France

**Nom de l'Equipe d'accueil et adresse si différente de celle du laboratoire :** Equipe PROTEO

**Nom du Directeur de thèse HDR :** Jean-Baptiste Sallée (HDR, 2013)

**Téléphone :** 0144277074

**Mail :** jean-baptiste.sallee@locean-ipsl.upmc.fr

• **Titre de la thèse en Français :** La circulation océanique planétaire et turbulence fine échelle associée, dans un contexte de changement climatique

• **Titre de la thèse en Anglais :** Global ocean circulation and associated small scale turbulence in the context of global climate change

• **Résumé Sujet en Français:**

***Contexte et objectif général***

La circulation océanique horizontale de l'océan mondial est caractérisée par des gyres à l'échelle des bassins avec des courants de bord ouest intensifiés. Ces gyres sont étroitement associés aux cellules d'*overturning* telles que les cellules d'*overturning* subtropicales et les cellules d'*overturning* de l'océan Atlantique Nord et de l'océan Austral. Les gyres et les cellules d'*overturning* transportent la chaleur, l'eau douce et le carbone sur l'ensemble du globe en formant une circulation océanique globale, déterminante pour le climat, et soumise au changement climatique actuel. Pour autant, les changements à long terme de la circulation globale, tant horizontale, que d'*overturning* est encore aujourd'hui peu connue, bloquant notre compréhension de l'évolution future des courants océaniques dans un contexte de changement climatique. Nous observons que les vents s'intensifient, que la circulation atmosphérique grande échelle change en se déplaçant vers les pôles, que l'océan se stabilise sous l'effet du réchauffement plus fort en surface qu'en profondeur ; tous ces changements ont des conséquences fondamentales pour la circulation océanique planétaire et la turbulence associée, mais sont pour autant encore peu compris : est-ce que ces changements influencent les courants moyens, avec des conséquences sur le transport de chaleur et de carbone planétaire ; est-ce que ces changements influencent la turbulence méso et méso-échelles avec des conséquences fondamentales pour la dynamique de surface et des écosystèmes marins ? Ces questions représentent un verrou scientifique flagrant et la question des changements de circulation dans le cadre du changement climatique est plus généralement un point majeur de limitation de notre compréhension du futur du climat à l'échelle du prochain siècle.

L'objectif de cette thèse est réexaminer certaines observations de l'océan avec un nouvel œil, sous l'angle des changements de la circulation horizontale grande échelle, et de la turbulence associée (sous-méso et méso-échelle), ainsi que d'investiguer la qualité des modèles de climat récent (CMIP6) pour reproduire ce passé, et prédire le futur, en différenciant modèle à haute résolution et modèle à basse résolution.

***Un œil nouveau sur des changements passés encore flous***

Les gyres et les courants de bord ouest associés dépendent des forçages atmosphériques et notamment du stress du vent à la surface de l'océan. Des changements du stress du vent sur les deux hémisphères sont observés, en particulier, le déplacement vers les pôles des systèmes atmosphériques dans le Pacifique Nord, l'Atlantique Nord et les océans Atlantique Sud, et peuvent renforcer ou déplacer les gyres subtropicaux vers le sud, comme suggéré par certaines études. Cependant, des observations récentes *in situ* et satellitaires, et des études plus régionales remettent en question ces résultats, notamment dans le courant Kuroshio, Gulf Stream, Agulhas et Est Australien.

Au lieu d'une intensification des courants, l'intensification des vents augmenterait la variabilité tourbillonnaire à mésoéchelle, plutôt que le courant en lui-même. Les conséquences seraient ainsi d'augmenter l'activité mésoéchelle et sous-mésoéchelle, avec d'importantes implications pour le budget global de chaleur de la couche de surface, et donc pour le bilan radiatif planétaire, ainsi que pour la biogéochimie et les écosystèmes marins de surface. Cet effet n'est pas pris en compte dans les modèles climatiques classiques et n'a pas encore été évalué dans les modèles climatiques à haute résolution.

Pour avancer sur ce point, la première partie de cette thèse réévaluera les données satellites altimétriques sur les presque 30 ans de données entre 1993 et 2020, pour évaluer les changements d'intensité et de position des courants moyens, de l'intensité tourbillonnaire approximée par EKE calculée par satellite altimétrique. Nous évaluerons également les changements à long terme des fronts sous-mésoéchelles associés, à partir de deux approximations : l'intensité d'exposant de Lyapunov (FTLE) et l'intensité des gradients de SST fines échelles. Ainsi la base de données Aviso référence stable dans le temps (2 satellites) sera utilisées pour aborder la question des courants moyens géostrophiques, de l'EKE, et du calcul des exposants de Lyapunov, en global, sur 30 ans. Et la base de données AVHRR, ESA Climate Change Initiative, Level 2, sera entièrement réanalyser sur 40 ans (1981-2020) pour détecter le nombre et l'intensité des forts gradients température de surface indiquant la présence de fronts de méso et sous-mésoéchelle au niveau global.

### ***Une meilleure compréhension des changements passés pour éclairer nos prédictions du futur***

Sous des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre futurs, les exercices de prédictions du climat futur de CMIP5 et CMIP6 prévoient que les gyres subtropicaux se renforcent au cours du 21e siècle, et se déplace vers le sud dans l'hémisphère sud. Dans l'Atlantique Nord, cependant, le très probable affaiblissement de la circulation d'*overturning* au cours du prochain siècle a tendance à réduire l'intensité du Gulf Stream. Cependant, étant donné la faible résolution des modèles climatiques actuels qui ne permet pas de bien représenter les tourbillons à mésoéchelle et les courants de bord Ouest, nous n'avons qu'une faible confiance dans ces résultats. Si comme la théorie et les observations passées semblent le montrer, l'augmentation de l'énergie mécanique due à l'augmentation des vents, passe dans l'augmentation des instabilités mésoéchelle et non pas dans l'augmentation des courants, alors il est clair que les simulations climatiques à basse résolution ne peuvent pas bien représenter le futur des courants océaniques.

En se basant sur l'analyse des observations, nous pourrions réévaluer si oui ou non, l'énergie méso et sous-mésoéchelle a augmenté au cours des dernières décennies, au contraire des courants moyens. Si tel était le cas, alors nous analyserions les changements de la circulation horizontale globale en différenciant la résolution des modèles, et en utilisant les observations passées, comme contraintes émergentes dans les simulations historiques, pour juger au mieux de la confiance que nous accordons dans telle ou telle projection future. Nous utiliserons pour cela l'ensemble de modèles CMIP6, dont le groupe de modèle et de simulations effectuées dans le cadre de HighResMip. Dans cette partie nous aborderons également la question du changement future des cellules d'*overturning* des océans Atlantique et Austral.

### ***Les processus associés et les implications***

En fonction de l'avancement de la thèse, des résultats obtenus et des envies scientifiques du candidat en thèse, nous aborderons en troisième partie de thèse soit (i) les mécanismes physiques associés aux changements mis à jour, en faisant des tests de sensibilité à partir du modèle climatique de l'IPSL ; (ii) soit une étude sur l'impact des changements de surface mis à jour sur l'activité biogéochimique de surface à partir d'observation et/ou de modèles ; (iii) soit une étude sur l'impact de circulation grande échelle et des changements de surface mis à jour sur le transport de chaleur global et le bilan de chaleur de la couche de surface de l'océan.

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

#### ***Context and general objective***

The horizontal ocean circulation of the world ocean is characterized by basin-scale gyres with intensified western boundary currents. These gyres are closely associated with overturning cells such as subtropical overturning cells and overturning cells from the North Atlantic and Southern Oceans. Gyres and overturning cells transport heat, freshwater and carbon across the globe, forming a global ocean circulation that is critical to the climate and subject to current climate change. However, the long-term changes affecting the global ocean circulation, both horizontal and overturning, are still poorly known, blocking our understanding of the future evolution of ocean

currents in the context of climate change. We observe that the winds intensify, that the large-scale atmospheric circulation are shifting poleward, that the ocean stabilizes under the effect of the warming stronger at the surface than at depth; all of these changes have fundamental consequences for planetary ocean circulation and associated turbulence, but are still not understood: do these changes influence mean currents, with consequences for the transport of heat and carbon; do these changes influence meso and mesoscale turbulence with fundamental consequences for surface dynamics and marine ecosystems? These questions represent a glaring scientific lock and the question of circulation changes in the context of climate change is more generally a major point of limitation of our understanding of the future of the climate within the 21<sup>st</sup> century.

The objective of this PhD project is to re-examine observations of the ocean with a new eye, from the angle of changes in large-scale horizontal circulation, and associated turbulence (sub-meso and meso-scale), as well as to investigate the quality of recent climate models (CMIP6) to reproduce this past, and predict the future, by differentiating high resolution model and low resolution model.

### ***A new look at past changes that are still vague***

The gyres and the associated western boundary currents depend on atmospheric forcings and in particular on the stress of the wind at the ocean surface. Changes in wind stress on both hemispheres are observed, in particular, the displacement towards the poles of atmospheric systems in the North Pacific, the North Atlantic and the South Atlantic oceans, and can strengthen or move the subtropical gyres southward, as suggested by some studies. However, recent *in situ* and satellite observations, and more regional studies question these results, particularly in the Kuroshio, Gulf Stream, Agulhas and East Australian currents. Instead of an intensification of the currents, the intensification of the winds would increase the eddy variability at mesoscale, rather than the current itself. The consequences would thus be to increase the mesoscale and sub mesoscale activity, with important implications for the global surface layer heat budget, and therefore for the Earth radiative budget, as well as for the surface ocean biogeochemistry and the marine ecosystems. This effect is not taken into account in conventional coarse climate models and has not yet been evaluated in high resolution climate models.

To advance on this point, the first part of this thesis will re-evaluate the altimetric satellite data over the 30 years of observation between 1993 and 2020, to evaluate the changes in intensity and position of the mean currents, and the eddy intensity approximated by EKE calculated from satellite altimeter. We will also assess the long-term changes in the associated submesoscale fronts, based on two approximations: the intensity of Lyapunov exponent (FTLE) and the intensity of small-scale SST gradients. The Aviso reference product, which is stable over time (2 satellites), will be used to address the question of geostrophic mean currents, EKE, and the calculation of Lyapunov exponents, overall, over 30 years. And the AVHRR database, ESA Climate Change Initiative, Level 2, will be entirely re-analyzed over 40 years (1981-2020) to detect the number and intensity of strong surface temperature gradients indicating the presence of meso and sub-mesoscale fronts.

### ***A better understanding of past changes to enlighten our predictions of the future***

Under future greenhouse gas emission scenarios, the future climate prediction exercises of CMIP5 and CMIP6 predict that the subtropical gyres will strengthen during the 21<sup>st</sup> century, and will move southward in the southern hemisphere. In the North Atlantic, however, the very likely weakening of the overturning circulation over the next century tends to reduce the intensity of the Gulf Stream. However, given the low resolution of current climate models which does not allow for a good representation of mesoscale eddies and western boundary currents, we have only a low confidence in these results. If as theory and past observations seem to show, the increase in mechanical energy due to the increase in winds, is transferred in the increase of mesoscale instabilities and not in the increase in currents, then the low-resolution climate simulations cannot accurately represent the future of ocean currents.

Based on the analysis of past observations, we will be able to reassess whether or not the meso and submesoscale energy has increased in recent decades, unlike the mean currents. If this were the case, then we would analyze the changes in global horizontal circulation by differentiating the resolution of the models, and using past observations, as emerging constraints in historical simulations, to best assess the confidence we place in such or such future projection. For this, we will use the CMIP6 model ensemble, including the group of models and simulations carried out within the framework of HighResMip. In this part we will also address the question of the future change of overturning cells in the Atlantic and Southern oceans.

### ***Associated processes and implications***

Depending on the progress of the successful candidate, the results obtained and the scientific motivations of the student, the third part of the project will either develop: (i) the physical mechanisms associated with the reassessed past changes, by making sensitivity experiments using the IPSL climate model; (ii) a study on the impact of updated surface changes on surface biogeochemical activity from observation and / or models; (iii) a study on the impact of large-scale circulation and updated surface changes on the overall heat transport and the heat budget of the ocean's surface layer.

• **Type de financement autre que ED 129, précisez si envisageable ou acquis:**

Pas d'autre financement prévu. Cependant des financements sont prévus et acquis pour « l'environnement de thèse » (conférences, papiers, visites, etc.).

• **Encadrement :**

**Les thèses qui se finissent cette année sont indiquées en italique.**

**Encadrement :**

*Lucie Vignes, SU, financement ED (50%), ERC (50%), date de soutenance : Décembre 2020*

Matthis Auger, SU, financement CNES (50%), CLS (50%), date de soutenance : Décembre 2021

**Co-encadrement (50%) :**

*Camille Akhoudas, SU, financement ED, date de soutenance : 29 Mai 2020*

Yona Silvy, SU, financement ED, date de soutenance : Décembre 2021