PROPOSITION DE STAGE DE MASTER 2

Structure tridimensionnelle des anneaux et des tourbillons cycloniques des Aiguilles : évolution temporelle et rôle des interactions air-mer

Lieu : École normale supérieure – PSL, LMD, Paris 75005

Encadrement : Pr Sabrina Speich

Collaborations : Pr Sebastiaan Swart (Université de Göteborg, Suède) et Pr Arne Biastoch (GEOMAR, Allemagne)

Introduction

La fuite des Aiguilles, c'est-à-dire le transfert d'eaux chaudes et salées de l'océan Indien vers l'Atlantique Sud, constitue une composante essentielle de la circulation méridienne de retournement globale et du système climatique (Gordon, 1986 ; Speich et al., 2007 ; Beal et al., 2011). Une grande partie de ce transfert est assurée par les anneaux des Aiguilles, de grands tourbillons anticycloniques détachés au niveau de la rétroflexion du courant des Aiguilles, qui dérivent à travers le bassin du Cap (Dencausse et al., 2010) et, pour certains, traversent l'ensemble de l'Atlantique Sud (Schouten et al., 2000 ; Laxenaire et al., 2018). Ces anneaux coexistent et interagissent avec de nombreux tourbillons cycloniques générés le long du talus du banc des Aiguilles et dans la zone subantarctique, ce qui fait du bassin du Cap l'une des régions les plus turbulentes de l'océan mondial (Boebel et al., 2003 ; Arhan et al., 2011 ; Ioannou et al., 2022 ; 2024).

Au cours de leur existence, la structure horizontale et verticale de ces tourbillons évolue considérablement. Les anneaux cèdent d'importantes quantités de chaleur à l'atmosphère, en particulier en hiver, lorsque le mélange convectif profond dans leur cœur entraîne la formation d'eaux modales et modifie leur structure thermohaline (Arhan et al., 1999 ; Laxenaire et al., 2019 ; 2020). Le vent agit également directement sur les tourbillons : la différence entre le vent et les courants de surface engendre un pompage d'Ekman associé aux tourbillons, qui amortit leur énergie cinétique (Dewar et Flierl, 1987 ; Gaube et al., 2015), tandis que la rétroaction thermique des anomalies de SST des tourbillons sur les flux turbulents de chaleur atténue leur signature en surface (Villas Bôas et al., 2015 ; Moreton et al., 2021). Il manque toutefois une quantification systématique de l'évolution temporelle de la structure tridimensionnelle des anneaux et des cyclones (rayon, extension verticale, masses d'eau du cœur, stratification), ainsi que de la part de cette évolution attribuable aux interactions air-mer. La plupart des analyses composites regroupent des tourbillons de tous âges et de toutes saisons (par exemple Chaigneau et al., 2011), ce qui tend à masquer ces processus.

Le programme international Argo fournit aujourd'hui une vaste base de profils de température et de salinité sur les 2 000 premiers mètres de l'océan (Wong et al., 2020). Combinés à l'algorithme automatique de détection et de suivi des tourbillons TOEddies, développé au LMD (Laxenaire et al., 2018 ; 2019 ; 2020 ; Ioannou et al., 2024), ces profils peuvent être associés à des tourbillons individuels dont l'histoire est connue grâce à l'altimétrie satellitaire. Les flotteurs piégés dans les tourbillons fournissent ainsi des séries temporelles de leur structure verticale. Pendant la campagne WHIRLS (MD252, N/O Marion Dufresne, du 29 juin au 28 juillet 2026, en collaboration avec le N/O SA Agulhas II), 18 flotteurs Argo ont été déployés dans le système du courant des Aiguilles, et des sections CTD et MVP300 à haute résolution ont été réalisées à travers des anneaux et des cyclones pendant l'hiver austral. Ces nouvelles données permettront d'enrichir les analyses statistiques.

Objectifs

L'objectif du stage est de caractériser l'évolution, au cours de leur existence, de la structure horizontale et verticale des anneaux et des tourbillons cycloniques des Aiguilles et de quantifier le rôle des interactions air-mer dans cette évolution.

Dans un premier temps, l'étudiant ou l'étudiante constituera une base de données centrée sur les tourbillons, en combinant l'atlas TOEddies (trajectoires, contours, événements de fusion et de séparation), les profils Argo situés à l'intérieur des tourbillons, dont ceux des flotteurs déployés pendant WHIRLS, les données hydrographiques historiques et les sections CTD et MVP300 de WHIRLS. Les anomalies seront calculées par rapport à une climatologie de référence établie à partir des profils hors tourbillons. Pour chaque tourbillon et chaque profil, plusieurs indicateurs structuraux seront estimés : rayon et vitesse maximale, nombre de Rossby, profondeur de l'anomalie maximale et extension verticale, déplacements des isopycnes, anomalies de contenu thermique et de sel, énergie potentielle disponible, ainsi que profondeur de la couche de mélange et épaisseur des eaux modales dans le cœur du tourbillon (de Boyer Montégut et al., 2004 ; Chen et al., 2022).

Dans un deuxième temps, des composites centrés sur les tourbillons seront construits en fonction de leur polarité, de leur âge, de la saison et de la région. Ils seront complétés par les séries temporelles de tourbillons individuels échantillonnés à plusieurs reprises par des flotteurs piégés (Laxenaire et al., 2019). Ces résultats seront interprétés dans le cadre théorique de la dynamique des fluides géophysiques (tourbillon potentiel, rayon de déformation et structure barocline des vortex ; Carton, 2001).

Enfin, les trajectoires des tourbillons seront colocalisées avec les flux turbulents de chaleur en surface et la tension du vent issus du produit satellitaire SeaFlux (Curry et al., 2004) et de la réanalyse ERA5 (Hersbach et al., 2020), ou d'ERA6 si cette réanalyse est disponible au moment du stage. L'étudiant ou l'étudiante calculera les anomalies de flux air-mer au-dessus des tourbillons par rapport aux eaux environnantes, la perte cumulée de chaleur le long de chaque trajectoire et le pompage d'Ekman induit par les tourbillons, déduit de la tension du vent relative (Gaube et al., 2015). Ces grandeurs seront mises en relation avec les changements observés de la profondeur de la couche de mélange, des propriétés du cœur, du contenu thermique et de l'extension verticale, afin d'évaluer la contribution des interactions air-mer à l'évolution des anneaux et des cyclones. La comparaison entre SeaFlux et ERA5 permettra également de déterminer avec quelle cohérence ces produits représentent les anomalies de flux à l'échelle des tourbillons. Les résultats alimenteront

l'analyse des observations WHIRLS et l'évaluation des simulations océaniques et couplées océan-atmosphère du projet.

Profil recherché

- Niveau : Master 2
- Prérequis : connaissances en dynamique des fluides géophysiques et en océanographie physique ; maîtrise de Python (xarray) ; intérêt pour l'analyse de grandes bases de données d'observation.
- Début et durée du stage : février-mars 2027, pour une durée de 5 à 6 mois.
- Lieu de travail : LMD-ENS, 24 rue Lhomond, 75005 Paris, en collaboration avec ....

Candidature

Envoyer un CV, une lettre de motivation et les relevés de notes de master avant le 30 janvier 2027.

Sabrina Speich: sabrina.speich@lmd.ipsl.fr

Références bibliographiques

Arhan, M., Mercier, H., & Lutjeharms, J. R. E. (1999). The disparate evolution of three Agulhas rings in the South Atlantic Ocean. Journal of Geophysical Research, 104(C9), 20987-21005.

Arhan, M., Speich, S., Messager, C., Dencausse, G., Fine, R., & Boye, M. (2011). Anticyclonic and cyclonic eddies of subtropical origin in the subantarctic zone south of Africa. Journal of Geophysical Research, 116, C11004.

Beal, L. M., De Ruijter, W. P. M., Biastoch, A., Zahn, R., & SCOR/WCRP/IAPSO Working Group 136 (2011). On the role of the Agulhas system in ocean circulation and climate. Nature, 472, 429-436.

Boebel, O., Lutjeharms, J., Schmid, C., Zenk, W., Rossby, T., & Barron, C. (2003). The Cape Cauldron: A regime of turbulent inter-ocean exchange. Deep-Sea Research II, 50, 57-86.

Carton, X. (2001). Hydrodynamical modeling of oceanic vortices. Surveys in Geophysics, 22, 179-263.

Chaigneau, A., Le Texier, M., Eldin, G., Grados, C., & Pizarro, O. (2011). Vertical structure of mesoscale eddies in the eastern South Pacific Ocean: A composite analysis from altimetry and Argo profiling floats. Journal of Geophysical Research, 116, C11025.

Chen, Y., S. Speich, R. Laxenaire (2022) Formation and transport of the South Atlantic Subtropical Mode Water in eddy-permitting observations. J. Geophys. Res., https://doi.org/10.1029/2021JC017767

Curry, J. A., et al. (2004). SEAFLUX. Bulletin of the American Meteorological Society, 85, 409-424.

de Boyer Montégut, C., Madec, G., Fischer, A. S., Lazar, A., & Iudicone, D. (2004). Mixed layer depth over the global ocean: An examination of profile data and a profile-based climatology. Journal of Geophysical Research, 109, C12003.

Dencausse, G., Arhan, M., & Speich, S. (2010). Routes of Agulhas rings in the southeastern Cape Basin. Deep-Sea Research I, 57, 1406-1421.

Dewar, W. K., & Flierl, G. R. (1987). Some effects of the wind on rings. Journal of Physical Oceanography, 17, 1653-1667.

Gaube, P., Chelton, D. B., Samelson, R. M., Schlax, M. G., & O'Neill, L. W. (2015). Satellite observations of mesoscale eddy-induced Ekman pumping. Journal of Physical Oceanography, 45, 104-132.

Gordon, A. L. (1986). Interocean exchange of thermocline water. Journal of Geophysical Research, 91(C4), 5037-5046.

Hersbach, H., et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146, 1999-2049.

Ioannou A, Speich S and Laxenaire R (2022) Characterizing Mesoscale Eddies of Eastern Upwelling Origins in the Atlantic Ocean and Their Role in Offshore Transport. Front. Mar. Sci. 9:835260. doi: https://doi.org/10.3389/fmars.2022.835260

Ioannou, A.; Guez, L.; Laxenaire, R.; Speich, S. (2024) Global Assessment of Mesoscale Eddies with TOEddies: Comparison Between Multiple Datasets and Colocation with In Situ Measurements. Remote Sens. 16, 4336. https://doi.org/10.3390/rs16224336

Laxenaire, R., Speich, S., Blanke, B., Chaigneau, A., Pegliasco, C., & Stegner, A. (2018). Anticyclonic eddies connecting the western boundaries of Indian and Atlantic oceans. Journal of Geophysical Research: Oceans, 123, 7651-7677.

Laxenaire, R., Speich, S., & Stegner, A. (2019). Evolution of the thermohaline structure of one Agulhas Ring reconstructed from satellite altimetry and Argo floats. Journal of Geophysical Research: Oceans, 124, 8969-9003.

Laxenaire, R., Speich, S., & Stegner, A. (2020). Agulhas ring heat content and transport in the South Atlantic estimated by combining satellite altimetry and Argo profiling floats data. Journal of Geophysical Research: Oceans, 125, e2019JC015511.

Moreton, S., Ferreira, D., Roberts, M., & Hewitt, H. (2021). Air-sea turbulent heat flux feedback over mesoscale eddies. Geophysical Research Letters, 48, e2021GL095407.

Schouten, M. W., de Ruijter, W. P. M., van Leeuwen, P. J., & Lutjeharms, J. R. E. (2000). Translation, decay and splitting of Agulhas rings in the southeastern Atlantic Ocean. Journal of Geophysical Research, 105(C9), 21913-21925.

Speich, S., B. Blanke, and W. Cai (2007) Atlantic Meridional Overturning and the Southern Hemisphere Supergyre. Geophys. Res. Lett., VOL. 34, L23614, doi: https://doi.org/10.1029/2007GL031583

Villas Bôas, A. B., Sato, O. T., Chaigneau, A., & Castelão, G. P. (2015). The signature of mesoscale eddies on the air-sea turbulent heat fluxes in the South Atlantic Ocean. Geophysical Research Letters, 42, 1856-1862.

Wong, A. P. S., et al. (2020). Argo data 1999-2019: Two million temperature-salinity profiles and subsurface velocity observations from a global array of profiling floats. Frontiers in Marine Science, 7, 700.

INTERNSHIP PROPOSAL

Three-Dimensional Structure of Agulhas Rings and Cyclones: Temporal Evolution and the Role of Air-Sea Interactions

Location: École Normale Supérieure – PSL, LMD, Paris 75005

Tutors: Prof. Sabrina Speich

Collaborators: Prof. Sebastiaan Swart (Uni. Gothenburg, Sweden), Prof. Arne Biastoch (GEOMAE, Germany)

Introduction

The Agulhas leakage, the transfer of warm and salty Indian Ocean waters into the South Atlantic, is a key component of the global overturning circulation and of the climate system (Gordon, 1986; Speich et al., 2007; Beal et al., 2011). A large part of this leakage is carried by Agulhas rings, large anticyclonic eddies shed at the Agulhas Retroflection that drift across the Cape Basin (Dencausse et al., 2010) and, for some of them, across the whole South Atlantic (Schouten et al., 2000; Laxenaire et al., 2018). Rings coexist and interact with numerous cyclones generated along the Agulhas Bank slope and in the subantarctic zone, which make the Cape Basin one of the most turbulent regions of the World Ocean (Boebel et al., 2003; Arhan et al., 2011; Ioannou et al., 2022; 2024).

Along their life, the horizontal and vertical structure of these eddies evolves considerably. Rings lose large amounts of heat to the atmosphere, especially in winter, when deep convective mixing within their cores produces mode waters and modifies their thermohaline structure (Arhan et al., 1999; Laxenaire et al., 2019; 2020). The wind also acts directly on eddies: the difference between wind and surface currents generates eddy-induced Ekman pumping that damps their kinetic energy (Dewar and Flierl, 1987; Gaube et al., 2015), while the thermal feedback of eddy SST anomalies on turbulent heat fluxes damps their surface signature (Villas Bôas et al., 2015; Moreton et al., 2021). However, a systematic quantification of how the three-dimensional structure of rings and cyclones (radius, vertical extent, core water masses, stratification) evolves with time, and of how much of this evolution can be attributed to air-sea interactions, is still lacking. Most composite analyses mix eddies of all ages and seasons (e.g., Chaigneau et al., 2011), which blurs these processes.

The international Argo program now provides a large database of temperature and salinity profiles of the upper 2000 m (Wong et al., 2020). Combined with the automatic eddy detection and tracking algorithm TOEddies developed at LMD (Laxenaire et al., 2018; 2019; 2020; Ioannou et al., 2024), these profiles can be attributed to individual eddies whose history is known from satellite altimetry, and floats trapped in eddies provide time series of their vertical structure. During the WHIRLS campaign (MD252, RV Marion

Dufresne, 29 June to 28 July 2026, in collaboration with the RV SA Agulhas II), 18 Argo floats were deployed in the Agulhas Current system, and high-resolution CTD and MVP300 sections were collected across rings and cyclones in austral winter, providing new data to augment these statistics.

Objectives

The goal of the internship is to characterise how the horizontal and vertical structure of Agulhas rings and cyclones varies along their life, and to quantify the role of air-sea interactions in this evolution.

First, the student will build an eddy-resolved database combining the TOEddies atlas (eddy trajectories, contours, merging and splitting events) with the Argo profiles found inside eddies, including those of the floats deployed during WHIRLS, historical hydrographic data, and the WHIRLS CTD and MVP300 sections. Anomalies will be computed relative to a reference climatology of out-of-eddy profiles. For each eddy and profile, the student will estimate structural metrics: radius and maximum velocity, Rossby number, depth of the maximum anomaly and vertical extent, isopycnal displacements, heat and salt content anomalies, available potential energy, and mixed-layer and mode-water thickness in the eddy core (de Boyer Montégut et al., 2004; Chen et al., 2022).

Second, eddy-centric composites will be constructed as a function of eddy polarity, age, season and region, and complemented by the time series of individual eddies repeatedly sampled by trapped floats (Laxenaire et al., 2019). These results will be interpreted in the theoretical framework of Geophysical Fluid Dynamics (potential vorticity, deformation radius and baroclinic structure of vortices; Carton, 2001).

Third, eddy trajectories will be colocated with the surface turbulent heat fluxes and wind stress from the satellite-based SeaFlux product (Curry et al., 2004) and from the ERA5 reanalysis (Hersbach et al., 2020), or ERA6 should it be released by the time of the internship. The student will compute the air-sea flux anomalies over eddies relative to their surroundings, the cumulative heat loss along each trajectory, and the eddy-induced Ekman pumping derived from the relative wind stress (Gaube et al., 2015). These quantities will be related to the observed changes in mixed-layer depth, core properties, heat content and vertical extent, in order to assess the contribution of air-sea interactions to the evolution of rings and cyclones. The comparison between SeaFlux and ERA5 will also show how consistently eddy-scale flux anomalies are represented in these products. The results will feed into the analysis of the WHIRLS observations and the evaluation of the ocean and coupled ocean-atmosphere simulations of the project.

Student profile

- Grade: Master 2
- Requirements: Knowledge of Geophysical Fluid Dynamics and physical oceanography, Python language (xarray); interest in large observational datasets
- Start date & duration: February-March 2027 & 5 to 6 months.
- Working address: the work will be based at the LMD-ENS (24 rue Lhomond 75005 Paris), in collaboration with ....

Application

CV, covering letter and Master transcripts before January 30, 2027

Sabrina Speich: sabrina.speich@lmd.ipsl.fr

References

Arhan, M., Mercier, H., & Lutjeharms, J. R. E. (1999). The disparate evolution of three Agulhas rings in the South Atlantic Ocean. Journal of Geophysical Research, 104(C9), 20987-21005.

Arhan, M., Speich, S., Messager, C., Dencausse, G., Fine, R., & Boye, M. (2011). Anticyclonic and cyclonic eddies of subtropical origin in the subantarctic zone south of Africa. Journal of Geophysical Research, 116, C11004.

Beal, L. M., De Ruijter, W. P. M., Biastoch, A., Zahn, R., & SCOR/WCRP/IAPSO Working Group 136 (2011). On the role of the Agulhas system in ocean circulation and climate. Nature, 472, 429-436.

Boebel, O., Lutjeharms, J., Schmid, C., Zenk, W., Rossby, T., & Barron, C. (2003). The Cape Cauldron: A regime of turbulent inter-ocean exchange. Deep-Sea Research II, 50, 57-86.

Carton, X. (2001). Hydrodynamical modeling of oceanic vortices. Surveys in Geophysics, 22, 179-263.

Chaigneau, A., Le Texier, M., Eldin, G., Grados, C., & Pizarro, O. (2011). Vertical structure of mesoscale eddies in the eastern South Pacific Ocean: A composite analysis from altimetry and Argo profiling floats. Journal of Geophysical Research, 116, C11025.

Chen, Y., S. Speich, R. Laxenaire (2022) Formation and transport of the South Atlantic Subtropical Mode Water in eddy-permitting observations. J. Geophys. Res., https://doi.org/10.1029/2021JC017767

Curry, J. A., et al. (2004). SEAFLUX. Bulletin of the American Meteorological Society, 85, 409-424.

de Boyer Montégut, C., Madec, G., Fischer, A. S., Lazar, A., & Iudicone, D. (2004). Mixed layer depth over the global ocean: An examination of profile data and a profile-based climatology. Journal of Geophysical Research, 109, C12003.

Dencausse, G., Arhan, M., & Speich, S. (2010). Routes of Agulhas rings in the southeastern Cape Basin. Deep-Sea Research I, 57, 1406-1421.

Dewar, W. K., & Flierl, G. R. (1987). Some effects of the wind on rings. Journal of Physical Oceanography, 17, 1653-1667.

Gaube, P., Chelton, D. B., Samelson, R. M., Schlax, M. G., & O'Neill, L. W. (2015). Satellite observations of mesoscale eddy-induced Ekman pumping. Journal of Physical Oceanography, 45, 104-132.

Gordon, A. L. (1986). Interocean exchange of thermocline water. Journal of Geophysical Research, 91(C4), 5037-5046.

Hersbach, H., et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146, 1999-2049.

Ioannou A, Speich S and Laxenaire R (2022) Characterizing Mesoscale Eddies of Eastern Upwelling Origins in the Atlantic Ocean and Their Role in Offshore Transport. Front. Mar. Sci. 9:835260. doi: https://doi.org/10.3389/fmars.2022.835260

Ioannou, A.; Guez, L.; Laxenaire, R.; Speich, S. (2024) Global Assessment of Mesoscale Eddies with TOEddies: Comparison Between Multiple Datasets and Colocation with In Situ Measurements. Remote Sens. 16, 4336. https://doi.org/10.3390/rs16224336

Laxenaire, R., Speich, S., Blanke, B., Chaigneau, A., Pegliasco, C., & Stegner, A. (2018). Anticyclonic eddies connecting the western boundaries of Indian and Atlantic oceans. Journal of Geophysical Research: Oceans, 123, 7651-7677.

Laxenaire, R., Speich, S., & Stegner, A. (2019). Evolution of the thermohaline structure of one Agulhas Ring reconstructed from satellite altimetry and Argo floats. Journal of Geophysical Research: Oceans, 124, 8969-9003.

Laxenaire, R., Speich, S., & Stegner, A. (2020). Agulhas ring heat content and transport in the South Atlantic estimated by combining satellite altimetry and Argo profiling floats data. Journal of Geophysical Research: Oceans, 125, e2019JC015511.

Moreton, S., Ferreira, D., Roberts, M., & Hewitt, H. (2021). Air-sea turbulent heat flux feedback over mesoscale eddies. Geophysical Research Letters, 48, e2021GL095407.

Schouten, M. W., de Ruijter, W. P. M., van Leeuwen, P. J., & Lutjeharms, J. R. E. (2000). Translation, decay and splitting of Agulhas rings in the southeastern Atlantic Ocean. Journal of Geophysical Research, 105(C9), 21913-21925.

Speich, S., B. Blanke, and W. Cai (2007) Atlantic Meridional Overturning and the Southern Hemisphere Supergyre. Geophys. Res. Lett., VOL. 34, L23614, doi: https://doi.org/10.1029/2007GL031583

Villas Bôas, A. B., Sato, O. T., Chaigneau, A., & Castelão, G. P. (2015). The signature of mesoscale eddies on the air-sea turbulent heat fluxes in the South Atlantic Ocean. Geophysical Research Letters, 42, 1856-1862.

Wong, A. P. S., et al. (2020). Argo data 1999-2019: Two million temperature-salinity profiles and subsurface velocity observations from a global array of profiling floats. Frontiers in Marine Science, 7, 700.