PROPOSITION DE STAGE DE MASTER 2

Influence des tourbillons de mésoéchelle des Aiguilles sur la couche limite atmosphérique marine : comparaison des observations WHIRLS et des réanalyses

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

Encadrement : Pr Sabrina Speich

Collaborations : Pr Agostino Meroni (Université de Milan-Bicocca, Italie) et Pr Sebastiaan Swart (Université de Göteborg, Suède)

Introduction

Les échanges de chaleur, d'humidité et de quantité de mouvement à l'interface air-mer régulent l'état et l'évolution du système climatique. À l'échelle des bassins océaniques, l'atmosphère force principalement l'océan : les vents forts refroidissent la surface de la mer, et la vitesse du vent de surface et la température de surface de la mer (SST) sont négativement corrélées. À la mésoéchelle océanique (10 à 200 km), cette relation s'inverse. Les anomalies de SST associées aux tourbillons et aux fronts influencent l'atmosphère sus-jacente, et les vents de surface sont plus forts au-dessus des eaux chaudes et plus faibles au-dessus des eaux froides (Small et al., 2008 ; Chelton et Xie, 2010 ; Seo et al., 2023). Deux mécanismes principaux ont été proposés : un mélange vertical accru de quantité de mouvement au-dessus des eaux chaudes, qui déstabilise et épaissit la couche limite atmosphérique marine (CLAM) (Wallace et al., 1989 ; Hayes et al., 1989), et un ajustement de la pression au niveau de la mer aux gradients de SST, qui entraîne une convergence des vents dans les basses couches (Lindzen et Nigam, 1987 ; Minobe et al., 2008). Par ces mécanismes, les tourbillons de mésoéchelle modulent les flux turbulents de chaleur, la hauteur de la couche limite, la nébulosité et les précipitations (Frenger et al., 2013 ; Villas Bôas et al., 2015).

Le système du courant des Aiguilles, au large de l'Afrique du Sud, est l'une des régions de l'océan mondial où l'activité tourbillonnaire est la plus intense et une zone majeure de transfert de chaleur de l'océan vers l'atmosphère. Des observations antérieures ont montré que les eaux chaudes des Aiguilles humidifient fortement et épaississent la couche limite sus-jacente (Lee-Thorp et al., 1999 ; Rouault et al., 2000), et qu'un seul tourbillon à cœur chaud peut modifier sensiblement la structure de la CLAM (Messager et Swart, 2016). Toutefois, les observations in situ permettant de résoudre la structure verticale de la

CLAM au-dessus de tourbillons individuels restent très rares, particulièrement pendant l'hiver austral. Par conséquent, la capacité des réanalyses atmosphériques telles qu'ERA5 (Hersbach et al., 2020), largement utilisées pour estimer les flux air-mer et forcer les modèles océaniques, à représenter la réponse atmosphérique aux anomalies de SST de mésoéchelle demeure insuffisamment évaluée. Leur résolution atmosphérique (environ 31 km pour ERA5) et le lissage du champ de SST prescrit devraient atténuer cette réponse, comme le suggèrent de récentes études de processus menées dans d'autres régions (Acquistapace et al., 2022).

La campagne WHIRLS (MD252, N/O Marion Dufresne, du 29 juin au 28 juillet 2026, en collaboration avec le N/O SA Agulhas II) a été conçue pour combler cette lacune. Elle a échantillonné les tourbillons, fronts et filaments des Aiguilles pendant l'hiver austral, période durant laquelle les contrastes océan-atmosphère et la fréquence des tempêtes sont proches de leur maximum annuel. La basse atmosphère a été documentée par 273 radiosondages, complétés par des profileurs atmosphériques, des lidars de vent, des drones aériens et des mesures météorologiques continues à bord. L'océan supérieur a été échantillonné simultanément à l'aide du thermosalinographe de surface (SST, salinité de surface ou SSS), de 204 profils du profileur remorqué MVP300 et de 106 stations CTD. Cet ensemble de données couplées offre une occasion unique d'étudier comment les tourbillons de mésoéchelle structurent la CLAM et d'évaluer les réanalyses à partir des observations.

Objectifs

L'objectif du stage est de quantifier la manière dont les tourbillons de mésoéchelle des Aiguilles (anneaux anticycloniques et tourbillons cycloniques) ainsi que les fronts associés modifient la structure de la couche limite atmosphérique marine, puis d'évaluer dans quelle mesure ERA5 (et ERA6, si cette réanalyse est disponible au moment du stage) reproduit la réponse observée.

Dans un premier temps, l'étudiant ou l'étudiante caractérisera l'océan supérieur le long de la route du navire en combinant les mesures de SST et de SSS en continu, les profils MVP300 et les stations CTD concomitantes : SST et gradients de SST, SSS, profondeur de la couche de mélange (MLD, estimée selon les critères classiques de densité et de température ; de Boyer Montégut et al., 2004 ; Chen et al., 2022) et contenu thermique de l'océan supérieur. Chaque radiosondage sera ensuite localisé par rapport aux tourbillons détectés par altimétrie satellitaire (notamment les mesures à haute résolution du niveau de la mer de SWOT), grâce à l'algorithme de détection et de suivi des tourbillons TOEddies développé au LMD (Laxenaire et al., 2018 ; Ioannou et al., 2024). Les radiosondages pourront ainsi être classés selon qu'ils échantillonnent le cœur d'un anticyclone, le cœur d'un cyclone, la périphérie d'un tourbillon ou un front, ou encore les conditions ambiantes hors tourbillon.

Dans un deuxième temps, des diagnostics de la CLAM seront établis à partir des radiosondages : hauteur de la couche limite (méthodes fondées sur le nombre de Richardson global et sur les gradients verticaux), intensité de l'inversion thermique, stabilité près de la surface (écarts de température et d'humidité entre l'air et la mer), profils de vitesse du vent et de cisaillement, estimation de la base des nuages et vapeur d'eau intégrée sur la colonne atmosphérique. Les flux turbulents de surface seront calculés à partir des mesures météorologiques du navire à l'aide de l'algorithme bulk COARE (Fairall et al., 2003). Ces propriétés atmosphériques seront mises en relation avec la SST observée, ses gradients et la profondeur de la couche de mélange, afin de distinguer les

rôles respectifs du mélange vertical et de l'ajustement de pression. Comme l'atmosphère hivernale est fortement influencée par les systèmes synoptiques (fronts froids, dépressions coupées de la circulation générale), les radiosondages seront regroupés par régime synoptique avant la construction de composites, de façon à isoler le signal induit par les tourbillons de la variabilité à grande échelle.

Enfin, les profils atmosphériques et champs de surface d'ERA5 (et d'ERA6, si disponible) seront colocalisés dans l'espace et le temps avec chaque radiosondage et le long de la route du navire. L'étudiant ou l'étudiante comparera aux observations la hauteur de la CLAM, les profils de température, d'humidité et de vent, les flux de surface et la SST utilisée comme condition à la limite inférieure. Il s'agira de déterminer si les biais des réanalyses dépendent de la polarité des tourbillons, des gradients de SST ou de la profondeur de la couche de mélange. Une attention particulière sera portée à la transmission éventuelle des radiosondages WHIRLS au Système mondial de télécommunications et à leur assimilation, qui conditionnent l'indépendance de la comparaison. Les résultats contribueront à l'interprétation des simulations couplées océan-atmosphère réalisées dans le cadre du projet WHIRLS.

Profil recherché

- Niveau : Master 2
- Prérequis : connaissances en dynamique des fluides géophysiques et/ou en météorologie de la couche limite ; maîtrise de Python (xarray) ; intérêt pour les données d'observation et les interactions air-mer.
- 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 le Dr Agostino Meroni (Université de Milan-Bicocca, Italie) et le Pr Sebastiaan Swart (Université de Göteborg, Suède).

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

Acquistapace, C., Meroni, A. N., Labbri, G., Lange, D., Späth, F., Abbas, S., & Bellenger, H. (2022). Fast atmospheric response to a cold oceanic mesoscale patch in the north-western tropical Atlantic. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 127.

Chelton, D. B., & Xie, S.-P. (2010). Coupled ocean-atmosphere interaction at oceanic mesoscales. Oceanography, 23(4), 52-69.

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.

Fairall, C. W., Bradley, E. F., Hare, J. E., Grachev, A. A., & Edson, J. B. (2003). Bulk parameterization of air-sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm. Journal of Climate, 16, 571-591.

Frenger, I., Gruber, N., Knutti, R., & Münnich, M. (2013). Imprint of Southern Ocean eddies on winds, clouds and rainfall. Nature Geoscience, 6, 608-612.

Hayes, S. P., McPhaden, M. J., & Wallace, J. M. (1989). The influence of sea-surface temperature on surface wind in the eastern equatorial Pacific: Weekly to monthly variability. Journal of Climate, 2, 1500-1506.

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

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.

Lee-Thorp, A. M., Rouault, M., & Lutjeharms, J. R. E. (1999). Moisture uptake in the boundary layer above the Agulhas Current: A case study. Journal of Geophysical Research, 104(C1), 1423-1430.

Lindzen, R. S., & Nigam, S. (1987). On the role of sea surface temperature gradients in forcing low-level winds and convergence in the tropics. Journal of the Atmospheric Sciences, 44, 2418-2436.

Messager, C., & Swart, S. (2016). Significant atmospheric boundary layer change observed above an Agulhas Current warm cored eddy. Advances in Meteorology, 2016.

Minobe, S., Kuwano-Yoshida, A., Komori, N., Xie, S.-P., & Small, R. J. (2008). Influence of the Gulf Stream on the troposphere. Nature, 452, 206-209.

Rouault, M., Lee-Thorp, A. M., & Lutjeharms, J. R. E. (2000). The atmospheric boundary layer above the Agulhas Current during alongcurrent winds. Journal of Physical Oceanography, 30, 40-50.

Seo, H., et al. (2023). Ocean mesoscale and frontal-scale ocean-atmosphere interactions and influence on large-scale climate: A review. Journal of Climate, 36.

Small, R. J., et al. (2008). Air-sea interaction over ocean fronts and eddies. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 45, 274-319.

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.

Wallace, J. M., Mitchell, T. P., & Deser, C. (1989). The influence of sea-surface temperature on surface wind in the eastern equatorial Pacific: Seasonal and interannual variability. Journal of Climate, 2, 1492-1499.

INTERNSHIP PROPOSAL

Imprint of Agulhas Mesoscale Eddies on the Marine Atmospheric Boundary Layer: WHIRLS Observations versus Reanalyses

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

Tutors: Prof. Sabrina Speich

Collaborators: Prof. Agostino Meroni (Università Milano Bicocca, Italy) and Prof. Sebastiaan Swart (Uni. Gothenburg, Sweden)

Introduction

Exchanges of heat, moisture and momentum at the air-sea interface regulate the state and evolution of the climate system. At the scale of ocean basins, the atmosphere mostly drives the ocean: strong winds cool the sea surface, and surface wind speed and sea surface temperature (SST) are negatively correlated. At the oceanic mesoscale (10 to 200 km), this relationship reverses. SST anomalies associated with eddies and fronts force the overlying atmosphere, and surface winds are stronger over warm water and weaker over cold water (Small et al., 2008; Chelton and Xie, 2010; Seo et al., 2023). Two main mechanisms have been proposed: the enhanced downward mixing of momentum over warm water, which destabilises and deepens the marine atmospheric boundary layer (MABL) (Wallace et al., 1989; Hayes et al., 1989), and the adjustment of sea-level pressure to SST gradients, which drives low-level convergence (Lindzen and Nigam, 1987; Minobe et al., 2008). Through these processes, mesoscale eddies modulate turbulent heat fluxes, boundary-layer height, clouds and rainfall (Frenger et al., 2013; Villas Bôas et al., 2015).

The Agulhas Current system around South Africa is one of the most energetic eddy regions of the World Ocean and a hotspot of ocean-to-atmosphere heat release. Previous observations showed that the warm Agulhas waters strongly moisten and deepen the overlying boundary layer (Lee-Thorp et al., 1999; Rouault et al., 2000) and that a single warm-core eddy can significantly modify the MABL structure (Messager and Swart, 2016). However, in situ observations resolving the vertical structure of the MABL above individual eddies remain very scarce, particularly in austral winter. As a consequence, the ability of atmospheric reanalyses such as ERA5 (Hersbach et al., 2020), widely used to estimate air-sea fluxes and to force ocean models, to represent the atmospheric response to mesoscale SST anomalies is poorly constrained. Their atmospheric resolution (about 31 km for ERA5) and the smoothing of the prescribed SST field are expected to damp this

response, as suggested by recent process studies in other regions (Acquistapace et al., 2022).

The WHIRLS campaign (MD252, RV Marion Dufresne, 29 June to 28 July 2026, in collaboration with the RV SA Agulhas II) was designed to fill this gap. It sampled Agulhas eddies, fronts and filaments in austral winter, when ocean-atmosphere contrasts and storm frequency are near their annual maximum. The lower atmosphere was documented by 273 radiosoundings, complemented by atmospheric profilers, wind lidars, aerial drones and continuous ship meteorological measurements. The upper ocean was simultaneously sampled by the underway thermosalinograph (SST, SSS), 204 profiles of the MVP300 towed profiler and 106 CTD stations. This coupled dataset provides a unique opportunity to document how mesoscale eddies shape the MABL and to evaluate reanalyses against it.

Objectives

The goal of the internship is to quantify how Agulhas mesoscale eddies (anticyclonic rings and cyclones) and their associated fronts modify the structure of the marine atmospheric boundary layer, and to assess to what extent ERA5 (and ERA6, should it be released by the time of the internship) reproduces the observed response.

First, the student will characterise the upper ocean along the ship track using the underway SST and SSS together with the MVP300 profiles and concomitant CTD stations: SST and SST gradients, SSS, mixed-layer depth (MLD, using standard density and temperature criteria; de Boyer Montégut et al., 2004; Chen et al., 2022) and upper-ocean heat content. Each radiosounding will then be positioned relative to the eddies detected in satellite altimetry (including high-resolution SWOT sea level) by the TOEddies eddy tracking algorithm developed at LMD (Laxenaire et al., 2018; Ioannou et al., 2024), so that it can be classified as sampling an anticyclone core, a cyclone core, an eddy edge or front, or background conditions.

Second, the student will derive MABL diagnostics from the radiosoundings: boundary-layer height (bulk Richardson number and gradient methods), inversion strength, near-surface stability (air-sea temperature and humidity differences), wind speed and shear profiles, cloud-base estimates and integrated water vapour. Surface turbulent fluxes will be computed from the ship meteorological data with the COARE bulk algorithm (Fairall et al., 2003). These atmospheric properties will be related to the observed SST, SST gradients and MLD, in order to identify the respective roles of the vertical mixing and pressure adjustment mechanisms. Because the winter atmosphere is strongly modulated by synoptic systems (cold fronts, cut-off lows), soundings will be grouped by synoptic regime before compositing, so that the eddy-induced signal can be separated from large-scale variability.

Third, ERA5 (and ERA6 if available) profiles and surface fields will be colocated in space and time with each radiosounding and along the ship track. The student will compare the MABL height, temperature, humidity and wind profiles, surface fluxes and the SST used as lower boundary condition with the observations, and determine whether the reanalysis biases are organised by eddy polarity, SST gradients or MLD. Particular attention will be paid to whether the WHIRLS soundings were transmitted to the Global Telecommunication System and assimilated, which affects the independence of the

comparison. The results will contribute to the interpretation of the ocean-atmosphere coupled simulations carried out within the WHIRLS project.

Student profile

- Grade: Master 2
- Requirements: Knowledge of Geophysical Fluid Dynamics and/or boundary-layer meteorology, Python language (xarray); interest in observational data and air-sea interactions
- 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 Dr. Agostino Meroni (Università Milao Bicocca, Italy) and Prof. Sebastiaan Swart (University of Gothenburg)

Application

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

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

References

Acquistapace, C., Meroni, A. N., Labbri, G., Lange, D., Späth, F., Abbas, S., & Bellenger, H. (2022). Fast atmospheric response to a cold oceanic mesoscale patch in the north-western tropical Atlantic. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 127.

Chelton, D. B., & Xie, S.-P. (2010). Coupled ocean-atmosphere interaction at oceanic mesoscales. Oceanography, 23(4), 52-69.

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.

Fairall, C. W., Bradley, E. F., Hare, J. E., Grachev, A. A., & Edson, J. B. (2003). Bulk parameterization of air-sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm. Journal of Climate, 16, 571-591.

Frenger, I., Gruber, N., Knutti, R., & Münnich, M. (2013). Imprint of Southern Ocean eddies on winds, clouds and rainfall. Nature Geoscience, 6, 608-612.

Hayes, S. P., McPhaden, M. J., & Wallace, J. M. (1989). The influence of sea-surface temperature on surface wind in the eastern equatorial Pacific: Weekly to monthly variability. Journal of Climate, 2, 1500-1506.

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

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.

Lee-Thorp, A. M., Rouault, M., & Lutjeharms, J. R. E. (1999). Moisture uptake in the boundary layer above the Agulhas Current: A case study. Journal of Geophysical Research, 104(C1), 1423-1430.

Lindzen, R. S., & Nigam, S. (1987). On the role of sea surface temperature gradients in forcing low-level winds and convergence in the tropics. Journal of the Atmospheric Sciences, 44, 2418-2436.

Messager, C., & Swart, S. (2016). Significant atmospheric boundary layer change observed above an Agulhas Current warm cored eddy. Advances in Meteorology, 2016.

Minobe, S., Kuwano-Yoshida, A., Komori, N., Xie, S.-P., & Small, R. J. (2008). Influence of the Gulf Stream on the troposphere. Nature, 452, 206-209.

Rouault, M., Lee-Thorp, A. M., & Lutjeharms, J. R. E. (2000). The atmospheric boundary layer above the Agulhas Current during alongcurrent winds. Journal of Physical Oceanography, 30, 40-50.

Seo, H., et al. (2023). Ocean mesoscale and frontal-scale ocean-atmosphere interactions and influence on large-scale climate: A review. Journal of Climate, 36.

Small, R. J., et al. (2008). Air-sea interaction over ocean fronts and eddies. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 45, 274-319.

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.

Wallace, J. M., Mitchell, T. P., & Deser, C. (1989). The influence of sea-surface temperature on surface wind in the eastern equatorial Pacific: Seasonal and interannual variability. Journal of Climate, 2, 1492-1499.