

ETUDE DES COMPOSANTES GEOSTROPHIQUES ET AGEOSTROPHIQUES DES COURANTS PAR L'ANALYSE COMBINEE DES BOUEES DERIVANTES ET DES PRODUITS SATELLITAIRES



Chaire Internationale en Physique Mathématique et Applications

(CIPMA-Chaire UNESCO)

Master Recherche en Océanographie Physique et Applications

Présenté par :

DONFACK Leonel Julio

Faculté des Sciences et Techniques (FAST)

Université d'Abomey-Calavi (UAC), Cotonou, République du Bénin

&

Université Toulouse III-Paul Sabatier, France

Année académique 2023-2024

© CIPMA Publié en 2024



Université d'Abomey-Calavi (UAC), BENIN

**Faculté des Sciences et Techniques (FAST)
Chaire Internationale en Physique Mathématique et Applications
(CIPMA-Chaire UNESCO)**

M. Sc No M. Sc/CIPMA/FAST/UAC/2024.

**ETUDE DES COMPOSANTES GEOSTROPHIQUES ET AGEOSTROPHIQUES
DES COURANTS PAR L'ANALYSE COMBINEE DES BOUEES
DERIVANTES ET DES PRODUITS SATELLITAIRES**

Master Recherche en Océanographie Physique et Applications

Présenté par :

DONFACK Leonel Julio

Sous la supervision de :

Professeur Emmanuel COSME **(IGE/MEOM),**
Professeur Clément UBELMANN **(GRENOBLE)**

Jury :

Président :

Examinateurs :

Rapporteur :

Cotonou, République du Bénin, Septembre 2024

SPONSORS



**Chaire Internationale en
Physique Mathématiques et
Applications**

**UNIVERSITE
PAUL
SABATIER**



TOULOUSE III

**Université Paul Sabatier /
Chaires Croisées**



**Programme Chaires Croisées
(Formation et Recherche en
Océanographie Physique et
Applications en Afrique de
l'Ouest)**



Deutscher Akademischer Austauschdienst
German Academic Exchange Service

**Deutscher Akademischer Austauschdienst
German Academic Exchange Service**



**Institut des Géosciences de
l'Environnement**

**ETUDE DES COMPOSANTES GEOSTROPHIQUES ET AGEOSTROPHIQUES
DES COURANTS PAR L'ANALYSE COMBINEE DES BOUEES
DERIVANTES ET DES PRODUITS SATELLITAIRES**

Soumis en accomplissement partiel des exigences
pour le diplôme de Master en Sciences (MSc) en Océanographie Physique
à l'Université Toulouse III & l'Université d'Abomey-Calavi.

Présenté par :

DONFACK Leonel Julio

Sous la supervision de :

Professeur Emmanuel COSME **(IGE/MEOM),**

Professeur Clément UBELMANN **(GRENOBLE)**

Dédicace

À ma Grand-mère
Christine VOTSOP, “MA CHACLEY TEZAR TETE”

.....

À ma Maman, la battante
Philomène SONNA, “MA CHACLEY TEZAR TETE”

.....

À mon Père
Thomas FOUAZEU, Que DIEU termine en toi ce qu'il a commencé.
J'espère que vous êtes fier de moi Papa

.....

Je vous aime

Remerciements

Tout d'abord, je remercie le Tout-Puissant pour la force qu'il me donne et la miséricorde qu'il a envers moi depuis mon enfance. Je ne pourrai jamais assez le remercier !

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements au Professeur Emmanuel COSME, le directeur de mon stage, pour la confiance et le soutien qu'il m'a accordés tout au long de l'encadrement de mon stage. Malgré le stage totalement fait à distance suite à l'annulation de mon séjour à l'IGE (Grenoble) à cause des difficultés administratives, il était toujours disponible pour les explications et les discussions autour du sujet pouvant atteindre dès fois de 4 tours d'horloge. En plus d'être un scientifique exceptionnel (son mérite est indéniable), il est une personne dotée d'une humanité sans pareille. Je tiens également à le remercier pour ses conseils avisés et ses encouragements lors des moments difficiles. "Le Professeur Emmanuel est, a été et restera ce mentor que j'ai toujours souhaité avoir dans le domaine de la recherche." Si je devais le remercier en détail, j'aurais besoin de plusieurs pages, mais en quelques mots, je tiens à lui exprimer mes sincères remerciements pour tout ce qu'il m'a apporté tant sur le plan scientifique que personnel. Au Professeur Clément UBELMANN, le co-directeur de ce stage, je dis également merci pour tout ce qu'il m'a apporté sur le plan scientifique et pour les qualités de rigueur qu'il m'a inculquées.

Un grand merci à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) et aux précurseurs de ce programme de master, sans lesquels ce travail n'aurait pas été possible.

Je tiens personnellement à exprimer mes plus sincères remerciements au Professeur Norbert HOUNKONNOU, au Professeur Isabelle DADOU et au Professeur BALOITCHA pour leurs conseils paternels et leur soutien tout au long de mon parcours académique. Un merci spécial aux sponsors mentionnés qui font de ce programme de master un ensemble complet pour faire progresser les sciences océaniques en Afrique.

Je voudrais remercier chaque membre du jury qui a accepté d'évaluer le présent travail.

Je tiens à remercier sincèrement tous ceux qui ont consacré leur temps à m'enseigner une partie de leurs connaissances au cours de cette année académique.

Je suis particulièrement reconnaissant à tous les enseignants dans le cadre de ce programme de master : Gael ALORY, Alexis CHAIGNEAU, Nick Hall, Yves MOREL, Essowe PANASSA, Zacharie SOHOU, Victor OKPEITCHA, Alexei KOURAEV, Pieter

VAN-BEEK, Fabrice MESSAL, Marie BONNIN, Adrien COMPTE, Casimir DA ALLADA, Donatus ANGNUURENG et Frédéric BONOU pour nous avoir enrichis de connaissances inestimables et ainsi nous permettre de devenir les scientifiques de l'océan que nous avions envisagés. Je tiens également à remercier mes superviseurs principaux de mon pays d'origine, le Dr G. J. AGHOUKENG, le Prof. J. MBANG et le Prof. R. D. AYISSI, qui, malgré leur emploi du temps chargé, m'ont soutenu dans mon programme et dans ma carrière future.

Je tiens à exprimer mes plus profondes obligations envers mon père Thomas FOUAZEYU et ma mère Philomène SONNA, qui prient toujours pour mon succès dans tous les aspects de la vie. Leur guidance parentale et leurs prières ont façonné la personne que j'espère devenir dans un avenir proche.

Faites place aux merveilles de 'OPA2024', Moussa NDIAYE, ma partenaire de toujours Héloïse HERON, Célina BENHADDAD (la BOSS de France), DEKPO Atsou, Enock DJORWE, Angèle HOUNKONNOU et Frédéric AKOTEGNON (les patrons de Calavi). Un grand merci à ces deux derniers pour leur chaleureux accueil qui a rendu mon séjour au Bénin vraiment agréable. Je remercie également les étudiants de la Chaire, Jean-Paul ANAGONOU (le président des étudiants), Abed-Nego SAMON (le créateur du nouveau site web du CIPMA), et d'autres pour avoir rendu la vie à Cotonou plus facile que prévu. Je ne pourrai jamais assez remercier Willy DIMA et Laeticia Ntangyong pour leur immense soutien en tant que compatriotes dans la réussite de mes études. Je remercie également le Dr Nathanael DOSSA, le docteur en océanographie physique pour les discussions fructueuses et les bons moments passés. Sans oublier Ayissi Francis, Roy NGAKALA, les anciens académiques et les doctorants actuels de la CIPMA, pour leur soutien et leur disponibilité.

Chapeau bas à mes camarades étudiants à l'Université de Yaoundé I pour leur soutien, leurs encouragements et leur compagnie pendant mon séjour, Olivier DONDJIO, Evrard NGUELE, Yvan NDONTSOP, et les autres. Merci à mes amis Dr Boris WEMBE, Cédric, Linda ; c'est grâce à vous que je n'avais pas la nostalgie du Cameroun.

Ma profonde gratitude va à toute ma famille (frères et sœurs, oncles, nièces, neveux, cousins, ...) et une particulière à ma petite sœur la cadette Sophie Merveille NGONNANG, je vous aime tous tellement, vous m'avez donné tellement d'amour et de responsabilités et je suis très heureux d'être votre frère, votre ange gardien. Désolé à toute la famille pour mes longues absences dans le passé et à l'avenir lors des événements familiaux.

Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui m'ont soutenu d'une manière ou d'une autre, et dont j'ai omis de mentionner les noms.

Résumé

L'altimétrie satellitaire fournit une estimation eulérienne à faible résolution des courants géostrophiques, tandis que les bouées dérivantes offrent une mesure lagrangienne des courants de surface, intégrant toutes leurs composantes. Avec l'avènement de nouvelles technologie, telles que les bases de données étendues de drifters et le satellite SWOT, il est pertinent de se demander dans quelle mesure les courants mesurés par les drifters peuvent être corrélés avec ceux observés par les satellites, et si SWOT apporte une amélioration significative par rapport à l'altimétrie classique. Ce travail vise à comparer les données du Global Drifter Program de la NOAA (résolution de $1^\circ \times 1^\circ$) et les produits satellitaires Globcurrent d'AVISO (résolution de $1/4^\circ$) ainsi que SWOT KaRIn et nadir (résolution de $1/60^\circ$), en ajustant les composantes agéostrophiques des courants selon les besoins.

Les oscillations inertielles sont obtenues en filtrant les données des courants des drifters. Nous avons utilisé trois méthodes de filtrage : le filtre linéaire Ubelmann, le filtre médian non linéaire, et le filtre linéaire de Hanning, qui est celui qui donne les résultats les plus cohérents. En effet, les tests montrent que le filtre de Hanning améliore le plus la qualité des courants de surface issus des drifters, avec une amélioration de 14% de la composante géostrophique pour la composante zonale et 16% pour la composante méridionale.

Un filtre glissant spatial puis temporel sur différentes fenêtres est également employé pour filtrer les petites échelles et les hautes fréquences contenues dans SWOT. Les données SWOT sont cohérentes avec les grandes échelles de CMEMS, après un filtrage spatial sur une fenêtre de l'ordre de 1° . La comparaison avec les bouées dérivantes révèle que CMEMS représente très mal les variations des courants des flotteurs. SWOT a une meilleure corrélation pour les courants géostrophiques zonaux, notamment après un lissage temporel de 5 jours, mais n'apporte pas d'amélioration apparente sur la composante méridionale. Ceci est interprété par la dissymétrie de la forme de la trace SWOT, très allongée selon la latitude et de petite largeur selon la longitude. De ce fait, le lissage spatial de 1° est problématique pour la direction zonale et l'estimation des courants méridiens (qui sont obtenus par dérivée zonale). Les simulations ont été faites avec le langage de programmation Python.

Mots clés : Circulation et dynamique océaniques, applications de trajectoire lagrangienne, Bouées dérivantes, Produits satellitaires, Océanographie physique.

Abstract

Satellite altimetry provides a low-resolution Eulerian estimate of geostrophic currents, while drifting buoys offer a Lagrangian measurement of surface currents, incorporating all their components. With the advent of new technologies, such as extensive drifter databases and the SWOT satellite, it is pertinent to question the extent to which drifter-measured currents can be correlated with those observed by satellites, and whether SWOT provides a significant improvement over traditional altimetry. This study aims to compare data from the NOAA Global Drifter Program ($1^\circ \times 1^\circ$ resolution) and satellite products from AVISO Globcurrent ($1/4^\circ$ resolution) as well as SWOT KaRIn and nadir ($1/60^\circ$ resolution), by adjusting the non-geostrophic components of the currents as needed.

Inertial oscillations are obtained by filtering the drifter current data. We used three filtering methods : the linear Ubelmann filter, the non-linear median filter, and the linear Hanning filter, which provides the most consistent results. Indeed, tests show that the Hanning filter most improves the quality of surface currents from drifters, with a 14% improvement in the geostrophic component for the zonal component and 16% for the meridional component.

A spatial and then temporal sliding filter over different windows is also employed to filter small scales and high frequencies contained within SWOT data. SWOT data are consistent with large-scale CMEMS data after spatial filtering with a window of about 1° . Comparison with drifter buoys reveals that CMEMS poorly represents the variations in drifter currents. SWOT shows better correlation for zonal geostrophic currents, particularly after a 5-day temporal smoothing, but does not provide apparent improvement for the meridional component. This is interpreted as a result of the asymmetry of the SWOT trace, which is elongated in latitude and narrow in longitude. Therefore, spatial smoothing at 1° is problematic for zonal direction and meridional current estimation (which is derived from zonal differentiation). Simulations were performed using the Python programming language.

Keywords : Ocean circulation and dynamics, Lagrangian trajectory applications, Drifting buoys, Satellite products, Physical oceanography.

Table des matières

| | |
|---|----------|
| Dédicace | i |
| Remerciements | ii |
| Résumé | iv |
| Abstract | v |
| Listes des figures | viii |
| 1 Introduction | 2 |
| 1 Énoncé du problème | 3 |
| 2 Objectifs et buts. | 3 |
| 3 Justification des objectifs | 3 |
| 4 Organisation de l'étude | 3 |
| 2 Composantes géostrophiques et agéostrophiques des courants | 4 |
| 1 La composante géostrophique | 4 |
| 2 Les composantes agéostrophiques | 5 |
| 2.1 La composante d'Ekman | 6 |
| 2.2 La composante inertielle | 6 |
| 3 Données et méthodes | 9 |
| 1 Données | 9 |
| 1.1 Données altimétriques | 9 |
| 1.2 Données des bouées dérivantes | 10 |
| 2 Méthodes | 11 |
| 2.1 Évaluation de la composante inertielle | 11 |
| 2.1.1 Filtre médian non linéaire | 11 |
| 2.1.2 Filtre de Hanning linéaire | 11 |
| 2.1.3 Filtre Ubelmann linéaire | 12 |
| 2.2 Disponibilité des outils | 13 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.3 | Diagnostic d'évaluation | 13 |
| 4 | Résultats, Analyses et Discussions | 15 |
| 1 | Validation des courants océaniques de surface issus des produits Globcurrents à l'aide des données de « Drifters » | 15 |
| 1.1 | Analyse combinée des drifters : tourbillon vs oscillations inertielles . | 15 |
| 1.1.1 | Analyse du drifter avec caractéristiques de tourbillon | 16 |
| 1.1.2 | Analyse du drifter avec oscillations inertielles | 19 |
| 2 | Synthèse des résultats pour l'ensemble des drifters | 22 |
| 5 | Contribution du satellite SWOT dans l'étude | 24 |
| 1 | Conception et Objectifs du Satellite SWOT | 24 |
| 2 | Diagnostic d'évaluations | 25 |
| 2.1 | Comparaison des courants géostrophiques d'AVISO avec ceux de SWOT | 26 |
| 2.2 | Comparaison des courants géostrophiques de SWOT et du Global Drifter. | 27 |
| 3 | Conclusion | 29 |
| 6 | Conclusion et recommandations | 30 |

Table des figures

| | | |
|-----|--|----|
| 3.1 | Satellites altimétriques : missions passées, en cours et futures (d'après Taburet et al., 2019) | 10 |
| 3.2 | Geographic outline (dashed box) of the analysis region. Drifter trajectories as shown during the period January 2019 to December 2023 were used for computing drifter velocities in the analysis. Number of drifters is 967. | 14 |
| 3.3 | Position des drifters à la date du 2019-01-01 06 :00 :00 | 14 |
| 4.1 | Courants zonal et méridional du drifter (a, c), courants géostrophiques interpolés Aviso (b, d), distribution SSH et position du drifter (e, f), distribution SST (g). | 17 |
| 4.2 | Comparaison des vitesses dérivées par dériveurs et satellites : séries temporelles (a, c) et analyse de corrélation, régression et RMSE (b, d). | 18 |
| 4.3 | Comparaison statistique des vitesses dérivées des drifters et des satellites pour (a) les courants zonaux et (b) les courants méridionaux. | 18 |
| 4.4 | Courants zonal et méridional du drifter (a, c), courants géostrophiques interpolés Aviso (b, d), distribution SSH et position du drifter (e, f), distribution SST (g). | 20 |
| 4.5 | Comparaison statistique des vitesses dérivées des drifters et des satellites pour (a, c) les courants zonaux et (b, d) les courants méridionaux. | 21 |
| 4.6 | Courants zonal et méridional drifters (a, b), courants géostrophiques interpolés Aviso (c, d). | 22 |
| 4.7 | Vitesse initiale inertielle : zonale u_0 en (bleu) et méridienne v_0 en (rouge). | 23 |
| 5.1 | Principe de mesure du satellite SWOT. Crédits : NASA-JPL | 24 |
| 5.2 | Projection de la hauteur de mer (SSH) de SWOT dans l'Atlantique tropical (a) et aperçu de sa trace (b). | 25 |
| 5.3 | Interpolation des courants géostrophiques SWOT et AVISO sur la grille SWOT : Cas zonal (a, b) et méridional (c, d). | 26 |
| 5.4 | Analyse statistique des corrélations spatiales entre les courants géostrophiques interpolés SWOT et AVISO : Cas zonal (a) et méridional (b). | 27 |

| | | |
|-----|--|----|
| 5.5 | Trace SWOT de la journée du 02 avril 2023 et trajectoire des drifters | 28 |
| 5.6 | Trajectoire des drifters superposée aux champs de vitesses méridiennes de SWOT et CMEMS | 28 |
| 5.7 | Analyse des séries temporelles entre les courants géostrophiques Cmems et les courants Drifters : Cas zonal (a) et méridional (b). | 29 |
| 5.8 | Analyse des séries temporelles entre les courants géostrophiques SWOT et les courants Drifters : Cas zonal (a) et méridional (b). | 29 |

LISTE DES ABREVIATIONS

| | | |
|----------------|-------|---|
| JPL : | | Jet Propulsion Laboratory |
| KaRIn : | | Ka-band Radar Interferometer |
| SWOT : | | Surface Water Ocean Topography |
| SAR : | | Synthetic Aperture Radar |
| DUACS : | | Data Unification and Altimeter Combination System |
| CMEMS : | | Copernicus Marine Environment Monitoring Service |
| NOAA : | . | National Ocean and Atmospheric Administration |
| u : | | Vitesse zonale drifter |
| v : | | Vitesse méridienne drifter |
| ue : | | Courant d'Ekman zonal |
| ve : | | Courant d'Ekman méridien |
| ui : | | Courant inertiel zonal |
| vi : | | Courant inertiel méridien |
| SSH : | | Sea Surface Height |
| ugeos : | | Courant géostrophique zonal |
| vgeos : | | Courant géostrophique méridien |

Introduction

Les courants de surface dans les environnements océaniques jouent un rôle fondamental dans le transport de l'énergie, de la chaleur, du sel et de divers traceurs sur de vastes distances. Leur dynamique influence les conditions climatiques, la dispersion des matériaux flottants et la gestion des ressources maritimes, ainsi que la dispersion des polluants. Traditionnellement, l'estimation des courants océaniques reposait sur les dérives des navires, une méthode limitée par un échantillonnage spatiotemporel grossier ([Richardson1989](#)). Depuis 1978, l'introduction des bouées dérivantes suivies par satellite, dans le cadre du Programme Global de Bouées Dérivantes de la NOAA, a permis d'améliorer considérablement l'évaluation des courants océaniques à l'échelle mondiale ([Niiler2003](#), [LumpkinPazos2007](#)).

Avec l'avènement de technologies plus récentes, telles que les bases de données étendues des drifters et les satellites de nouvelle génération comme SWOT (Surface Water Ocean Topography), notre compréhension des courants marins s'est encore enrichie. Les observations satellitaires, notamment via les produits Globcurrent d'AVISO et les données du programme CMEMS, ont transformé notre analyse des courants océaniques en offrant une vue plus détaillée de leur dynamique et de leur interaction avec le climat global ([Picaut1990](#), [Lagerloef1999](#), [Sudre2013](#)). Cependant, la caractérisation précise des courants agéostrophiques à des échelles inférieures à 50 km, essentielles pour comprendre les mécanismes régionaux, reste un défi ([DohanMaximenko2010](#)).

Pour combler ces lacunes, cette étude se concentre sur l'Atlantique tropical en combinant les données des bouées dérivantes du Global Drifter Program, les produits satellitaires Globcurrent, et les mesures de haute précision fournies par le satellite SWOT, lancé en 2022. L'objectif est de comparer les courants géostrophiques et agéostrophiques mesurés par ces différentes sources, en utilisant des méthodes de filtrage adaptées pour analyser les oscillations inertielles et les variations spatio-temporelles. Cette approche vise à affiner notre compréhension des courants océaniques à des échelles fines (méso-échelle et sous-mésos-échelle, [Wang et al., 2019](#)) et à évaluer les améliorations apportées par les nouvelles technologies par rapport aux méthodes classiques d'altimétrie satellitaire.

1.1 Énoncé du problème

Les courants de surface océanique, cruciaux pour le climat, les écosystèmes marins et les activités humaines, posent des défis d'échantillonnage spatial et temporel. La caractérisation précise des courants à petite échelle (10-50 km) est limitée ([Picaut et al., 1990](#); [Lagerloef et al., 1999](#)), impactant notre compréhension de leur variabilité, particulièrement dans des régions clés comme l'Atlantique tropical.

1.2 Objectifs et buts.

L'objectif principal de cette étude est de confronter les courants issus des bouées et ceux issus des produits globaux distribués par le CMEMS ou ceux issus de l'altimétrie. Pour ce faire, nous nous fixons les objectifs spécifiques suivants :

- Évaluer la justesse des produits globaux du CMEMS en les comparant aux courants mesurés par les bouées.
- Évaluer la contribution du satellite SWOT par rapport à l'altimétrie classique.

1.3 Justification des objectifs

La réalisation de ces objectifs permettra non seulement de combler les lacunes actuelles dans la compréhension des courants océaniques à petite échelle, mais aussi de fournir des informations cruciales pour améliorer les modèles de prévision océanique et les prédictions climatiques. Une meilleure caractérisation des courants agéostrophiques contribuera à une gestion efficace des ressources marines et évaluation accrue des impacts environnementaux.

1.4 Organisation de l'étude

Ce document de recherche est organisé en six chapitres. Le chapitre deux donne une description générale des composantes géostrophiques et agéostrophiques des courants marins ainsi que les méthodes classiques d'évaluation et leurs limites. Le troisième chapitre détaille la méthodologie employée pour vérifier la précision de ces composantes. Les résultats obtenus seront présentés et discutés dans le quatrième et le cinquième chapitre, tandis que le sixième chapitre conclura notre mémoire de recherche en résumant les principales conclusions, en discutant des implications et en suggérant des directions pour de futures recherches.

Composantes géostrophiques et agéostrophiques des courants

Ce chapitre vise à décrire les différentes composantes des courants océaniques, en les classant en deux grandes catégories : les courants géostrophiques et les courants agéostrophiques. Les courants agéostrophiques incluent des phénomènes tels que l'effet Ekman et les oscillations inertielles. Les courants marins peuvent ainsi être décomposés en courants zonaux et méridionaux (u, v), qui résultent de la somme des composantes géostrophiques (u_g, v_g), d'Ekman (u_e, v_e) et inertielles (u_i, v_i) .

Pour analyser ces composantes, nous utilisons les équations du mouvement formulées par [Bougeault et Sadourny \(2001\)](#). En considérant un repère lié à la Terre (c'est-à-dire tournant avec l'axe z représentant la verticale au lieu), et en supposant un fluide homogène et stationnaire, les équations de conservation de la quantité de mouvement se présentent comme suit :

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{f}_{\text{cor}} + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2.1)$$

où \mathbf{u} est la vitesse du courant, ρ est la densité du fluide, p est la pression, \mathbf{f}_{cor} est la force de Coriolis, et ν est la viscosité. L'équation de conservation de la masse pour un fluide incompressible est donnée par :

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2.2)$$

Ces équations permettent de modéliser et de comprendre les différents types de courants océaniques en tenant compte des effets géostrophiques et agéostrophiques.

2.1 La composante géostrophique

Le bilan géostrophique, qui suppose une advection du moment et des forces de friction faibles, fournit les vitesses géostrophiques u_g et v_g en dehors de la bande équatoriale, où

la force de Coriolis est nulle. Les équations géostrophiques sont :

$$u_g = -\frac{g}{f} \frac{\partial h}{\partial y} \quad (2.3)$$

$$v_g = \frac{g}{f} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.4)$$

où f est le paramètre de Coriolis, g l'accélération due à la gravité ($9,807 \text{ m/s}^2$), h la carte de la topographie dynamique absolue (MADT), et y et x les positions en latitude et longitude. Ces données proviennent du Data Unification and Altimeter Combination System AVISO (www.aviso.oceanobs.com/en/data/products/information/duacs) avec une résolution de $1/3^\circ$ en grille Mercator.

À l'équateur, où $f = 0$, les équations géostrophiques deviennent singulières. [Moore et Philander \(1978\)](#) recommandent d'utiliser la seconde dérivée du champ de pression méridien avec $f = by$, où b est une constante. Les équations pour les courants semi-géostrophiques u_{sg} et v_{sg} sont :

$$u_{sg} = -\frac{g}{\beta} \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \quad (2.5)$$

$$v_{sg} = \frac{g}{\beta} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \quad (2.6)$$

où $\beta = 2.3 \times 10^{-11} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Pour utiliser ces équations, la première dérivée méridienne de h doit être nulle, nécessitant un facteur de correction dans la MADT ([Picaut et Tournier, 1991](#)). La continuité entre les régimes géostrophiques et semi-géostrophiques est assurée par une fonction spline dans la bande 28°N – 28°S , tandis qu'en dehors de cette zone, les courants restent géostrophiques.

2.2 Les composantes agéostrophiques

Les composantes agéostrophiques des courants émergent lorsque les conditions idéales du mouvement géostrophique, caractérisées par un équilibre entre la force de Coriolis et le gradient de pression, sont perturbées par des influences externes telles que le frottement, les variations de densité, et les forces non géostrophiques. Ces perturbations modifient la vitesse, la direction et la trajectoire des courants par rapport aux prévisions géostrophiques, pourtant cruciales pour le transport de chaleur et de matière.

En isolant les effets agéostrophiques, on peut exprimer les composantes agéostrophiques des courants marins comme :

$$\mathbf{u}_{\text{âgeos}} = \mathbf{u} - \mathbf{u}_{\text{geos}} \quad (2.7)$$

où \mathbf{u}_{geos} est la vitesse du courant calculée à partir de la solution géostrophique, et $\mathbf{u}_{\text{âgeos}}$ représente les déviations agéostrophiques définies de la manière suivante :

2.2.1 La composante d'Ekman

Le modèle d'Ekman, basé sur les travaux de [van Meurs et Niiler \(1997\)](#) et [Lagerloef et al. \(1999\)](#), décrit le bilan de moment linéaire pour le courant entraîné par le vent avec les équations suivantes :

$$fh_e u_e + r_e v_e = \frac{\tau_y}{\rho} \quad (2.8)$$

$$r_e u_e - fh_e v_e = \frac{\tau_x}{\rho} \quad (2.9)$$

où $\tau = (\tau_x, \tau_y)$ est le champ de stress du vent, $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ est la densité de l'eau, et h_e et r_e sont respectivement l'épaisseur de la couche d'Ekman et le coefficient de traînée linéaire. Ces paramètres doivent être estimés avant de déterminer le courant d'Ekman, mais ils sont souvent inconnus dans l'océan réel. [Lagerloef et al. \(1999\)](#) ont dérivé (h_e, r_e) par une régression linéaire constante, tandis que [Sudre et Morrow \(2008\)](#) ont suggéré une amélioration pour tenir compte de la variabilité de h_e . [Sudre \(2013\)](#) a tenté d'estimer ces paramètres à partir des observations des dériveurs de surface, mais la rotation terrestre et les forces inertielles ajoutent des complexités supplémentaires à l'amélioration des modèles de courants de surface ([Liu et al., 2022](#)).

2.2.2 La composante inertielle

Le modèle de régression inertuelle du courant, selon [Durran \(1993\)](#), se base sur les équations suivantes pour le bilan du moment linéaire stable :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.11)$$

où p est la pression, ρ la densité, et u et v les composantes de la vitesse du vent en

coordonnées cartésiennes avec x est-ouest ([Holton 1992, p. 40](#)). Comme dans l'approximation classique du "plan f", supposons f constant et les mouvements verticaux négligés, l'oscillation inertie apparaît lorsque les gradients de pression sont nuls :

$$\frac{du}{dt} - fv = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{dv}{dt} + fu = 0 \quad (2.13)$$

En différentiant la première équation par rapport au temps et en utilisant la seconde, on obtient :

$$\frac{du}{dt} + fu = 0 \quad (2.14)$$

qui a des solutions sinusoïdales avec une période $\frac{2\pi}{f}$. Avec $u = u_0$ et $v = 0$ à $t = 0$, les vitesses ultérieures sont :

$$u_i(t) = u_0 \cos(ft) \quad (2.15)$$

$$v_i(t) = u_0 \sin(ft) \quad (2.16)$$

Un paquet d'air suit une trajectoire circulaire d'inertie :

$$x(t) = \frac{u_0}{f} \sin(ft) \quad (2.17)$$

$$y(t) = -\frac{u_0}{f} \cos(ft) \quad (2.18)$$

Le rayon de courbure pour un déplacement anticyclonique est $\frac{u_0}{f}$. La gravité influence également l'oscillation inertie [Durran \(1993\)](#). Les détails sur l'estimation de cette composante seront fournis dans la section Méthode du chapitre 3.

En conclusion, ce chapitre a clarifié les différentes composantes des courants océaniques en distinguant les courants géostrophiques, qui résultent de l'équilibre entre la force de Coriolis et le gradient de pression, des courants agéostrophiques, influencés par des phénomènes comme l'effet Ekman et les oscillations inertielles. En utilisant des modèles avancés et des équations de conservation, nous avons étudié comment ces courants interagissent, ce qui est crucial pour améliorer les prévisions océaniques et les applications.

Cependant, évaluer précisément ces différentes composantes mesurées est complexe en raison des limites des méthodes classiques comme les modèles numériques et les observations directes. Les bouées dérivantes offrent des données précises mais limitées géographiquement, tandis que les altimétries satellitaires couvrent de vastes zones mais manquent parfois de précision. Le satellite SWOT fournit des estimations très précises des courants géostrophiques. Une solution efficace est de combiner les données détaillées des bouées avec la couverture étendue des produits satellitaires ([Sudre et al., 2013](#)).

Données et méthodes

“Quiconque persévère dans sa recherche est amené tôt ou tard à changer de méthode”

J. W. Goethe

Dans ce chapitre, nous décrivons les principales données exploitées durant ce mémoire de recherche ainsi que les différentes méthodes utilisées. Les données sont essentiellement constituées d'observations satellitaires et de données in-situ. Il s'agit des données de hauteur et les anomalies de la mer, la température de surface, ainsi que les courants géostrophiques, d'Ekman et totaux mesurés par des bouées dérivantes.

3.1 Données

3.1.1 Données altimétriques

L'altimétrie satellitaire mesure et cartographie la topographie des océans avec une couverture globale. Lancée avec Geos-3 en 1975 et développée avec Topex/Poseidon en 1992 par la NASA et le CNES, cette technique offre une résolution de 0,25° et 1 jour. Depuis, des satellites plus avancés ont amélioré la précision des mesures et leur intégration dans les modèles climatiques (Dufau et al., 2016 ; Hermozo, 2018).

La Figure 3-1 présente les missions altimétriques passées et futures, y compris la mission SWOT, lancée fin 2022, qui fournit des données haute résolution sur les niveaux d'eau des océans et des eaux continentales. La mesure altimétrique utilise des ondes radar pour déterminer la distance entre un satellite et la surface de la mer, permettant d'estimer la hauteur de la mer et la topographie dynamique absolue (ADT) en référence au géoïde, remplaçant ainsi l'ellipsoïde de référence. La hauteur de la mer (SSH) est calculée en soustrayant la distance mesurée de l'altitude du satellite.

Dans mon travail de recherche, j'utilise des données d'altimétrie, comprenant l'anomalie de niveau de la mer (SLA), de température de surface (SST), les courants géostrophiques zonal (ugeos) et méridional (vgeos), ainsi que les composantes zonales et méridionales du

courant d'Ekman (u_e et v_e). Ces données, fournies en libre accès par le service CMEMS, sont interpolées sur une grille régulière de $0,25^\circ$ en longitude/latitude et mises à jour quotidiennement. Pour l'analyse des anomalies du niveau de la mer et des courants géostrophiques (2019-2023), nous utilisons le produit Globcurrent d'AVISO. Les données de SST proviennent du produit MULTIOBS. Les données du satellite SWOT du produit NRT SWOT KaRIn & nadir (grille de $1/60^\circ$, mars-juillet 2023) sont également utilisées.

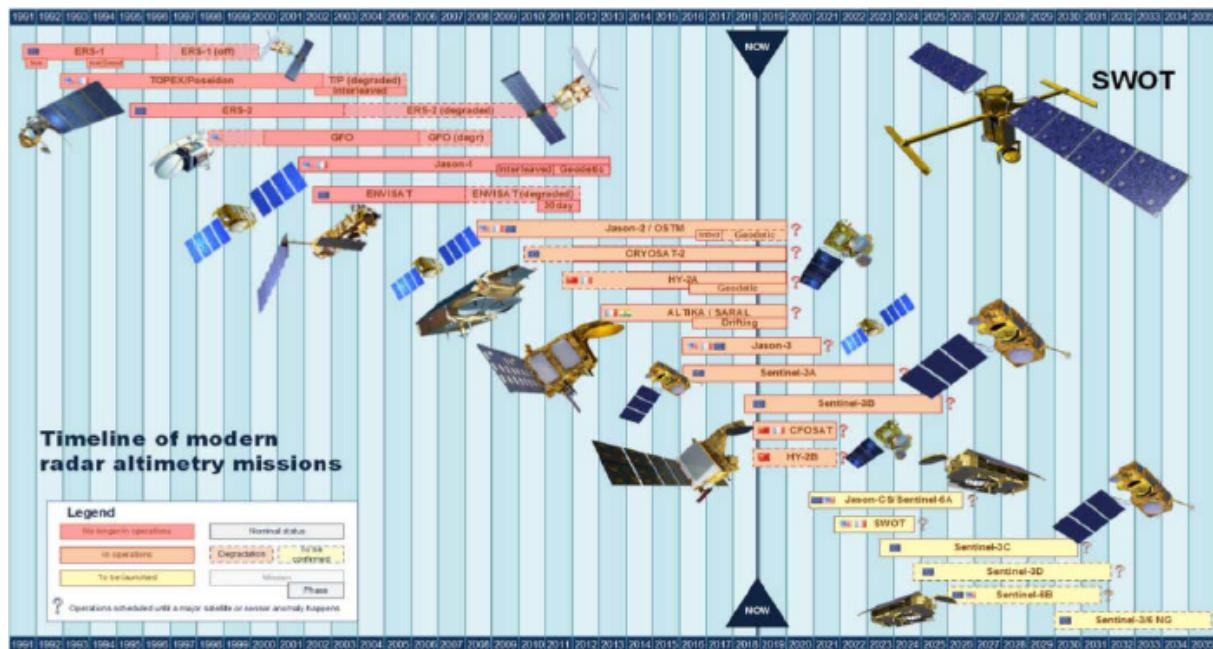


FIGURE 3.1 – Satellites altimétriques : missions passées, en cours et futures (d'après Taburet et al., 2019)

3.1.2 Données des bouées dérivantes



Figure 3.1 – Photos d'une bouée dérivante (Bourlès et al., 1999a page 98). La drogue de subsurface se positionne à environ 15m de profondeur. Les données sont transmises quotidiennement par le système de transmission par satellites Argos.

Dans cette recherche, j'utilise des données de drifter (courant zonal v_e et méridional v_n), fournies par la NOAA. Ces données, à résolution temporelle de 6 heures et de résolution spatiale $1^\circ \times 1^\circ$, couvrent 2019 à 2023 et sont disponibles quotidiennement via le Global Drifter Program. La [Figure 3.2](#) présente la photo d'un drifter. Les drifters mesurent les courants marins en se déplaçant avec eux et enregistrent les variations de leur position.

3.2 Méthodes

3.2.1 Évaluation de la composante inertielle

La composante inertielle des courants mesurés par les bouées dérivantes est extraite des données en utilisant trois types de filtres spécifiques : le [filtre médian non linéaire](#), le [filtre de Hanning linéaire](#), et le [filtre Ubelmann linéaire](#).

3.2.1.1 Filtre médian non linéaire

Le filtre médian non linéaire est particulièrement utile pour traiter les séries temporelles des composantes de courant des drifters, en réduisant le bruit tout en conservant les variations significatives. Soit $x(t)$ la série temporelle des composantes de courant mesurées par un drifter. Le filtre médian remplace chaque valeur $x(t_i)$ par la médiane des valeurs dans une fenêtre temporelle autour de t_i . Mathématiquement, pour une fenêtre temporelle de taille $2k + 1$ centrée en t_i , la valeur filtrée $x'(t_i)$ est donnée par :

$$x'(t_i) = \text{Mediane}(x(t_{i-k}), x(t_{i-k+1}), \dots, x(t_{i+k}))$$

où Mediane désigne la fonction qui calcule la médiane des valeurs dans la fenêtre temporelle. Le choix de la taille de la fenêtre $2k + 1$ est crucial : une fenêtre plus grande peut mieux éliminer le bruit, mais peut également lisser davantage les variations réelles des courants. En revanche, une fenêtre plus petite permet de préserver les détails plus fins mais peut ne pas supprimer efficacement le bruit. Ce filtre est donc adapté pour éliminer les anomalies tout en préservant les variations fondamentales du courant mesuré.

3.2.1.2 Filtre de Hanning linéaire

Le filtre de Hanning linéaire est particulièrement utile dans le traitement des séries temporelles des composantes de courant des drifters. Ce filtre adoucit les transitions dans les données en lissant les valeurs et en réduisant les variations brusques. Ce processus amé

-liore la précision de l'analyse en fréquence en éliminant les composantes haute fréquence non désirées.

Mathématiquement, le filtre de Hanning est appliqué à une série temporelle $x(t)$ en utilisant une fonction fenêtre définie pour une fenêtre de taille N . La fonction fenêtre de Hanning $w(t)$ est donnée par :

$$w(t) = 0.5 \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi t}{N-1} \right) \right)$$

où t varie de 0 à $N-1$. Pour appliquer le filtre, chaque valeur $x(t_i)$ de la série temporelle est multipliée par la valeur correspondante de la fonction fenêtre $w(t_i)$:

$$x'(t_i) = x(t_i) \cdot w(t_i)$$

Ainsi, le filtre de Hanning améliore la qualité des analyses en fréquence en éliminant les composantes de bruit non souhaitées et en facilitant l'interprétation des variations réelles des courants mesurés.

3.2.1.3 Filtre Ubelmann linéaire

Le filtre Ubelmann linéaire, conçu spécifiquement pour cette recherche, est un filtre de convolution qui utilise une réponse impulsionale adaptée aux caractéristiques inertielles des courants pour isoler efficacement la composante inertuelle des courants en se basant sur la fréquence de Coriolis f_c . Le paramètre de temps du filtre est :

$$\tau_l = \frac{3}{f_c}$$

Le filtre est défini comme :

$$g(t) = e^{-if_ct} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\tau_l}\right)^2}$$

et est normalisé pour que la somme des valeurs absolues soit égale à 1 :

$$g_{\text{normalisé}}(t) = \frac{g(t)}{\sum_t |g(t)|}$$

Il est appliqué au signal complexe U (composé de la vitesse en u et v) par convolution :

$$U_{\text{filtré}}(t) = (U * g)(t)$$

où $*$ représente la convolution entre le signal U et le filtre $g(t)$.

3.2.2 Disponibilité des outils

Pour notre analyse, nous avons utilisé Python 3.5 pour les calculs et GitHub pour la collaboration et la documentation du code. Les liens vers le code GitHub et les données du Global Drifter Program de la NOAA, de SWOT, de Globcurrent d'AVISO, ainsi que celles des données de SST sont fournis respectivement par :

1. <https://github.com/Julio-Leonel-Donfack> ;
2. https://erddap.aoml.noaa.gov/gdp/erddap/tabledap/drifter_6hour_qc.html ;
3. <https://filesender.renater.fr/?s=download&token=b80bdfdb-2153-421d-86\af-dc3849c1516e>.
4. https://data.marine.copernicus.eu/product/MULTIOBS_GLO_PHY_MYNRT_015_003/download
5. https://data.marine.copernicus.eu/product/MULTIOBS_GLO_PHY_SSS_L4_MY_015_015/download.

3.2.3 Diagnostic d'évaluation

Pour évaluer les courants de surface océaniques, nous avons utilisé 967 drifters du Programme Global Drifter de la NOAA. Les trajectoires de ces drifters, montrées à la [Figure 4.1](#), révèlent une répartition quotidienne d'environ une Soixantaine d'unités, avec des positions variant chaque jour, comme illustré à la [Figure 4.2](#).

Les drifters sont majoritairement influencés par des effets inertielles (91,42 %) et, dans une moindre mesure, par des tourbillons. La période inertuelle est donnée par $T = \frac{2\pi}{f}$ avec $f = 2\Omega \sin(\phi)$, où Ω est la vitesse angulaire de la Terre et ϕ la latitude. Les tourbillons sont détectés par un algorithme en deux étapes : localisation du centre (maximum ou minimum de la SLA/ADT) et délimitation du bord (contour fermé autour du centre) ([Chaigneau2008](#), [Chaigneau2009](#), [Pegliasco2015](#), [Assassi et al., 2016](#)).

Les premières analyses ont été menées sur deux drifters, puis étendues à l'ensemble des drifters pour une vue d'ensemble. Pour comparer les courants géostrophiques avec les données des drifters, les courants géostrophiques du produit Globcurrent ont été ajustés et interpolés pour correspondre aux positions des drifters. Ces courants géostrophiques ont ensuite été combinés avec les composantes d'Ekman fournies par Globcurrent et les oscillations inertielles ont été filtrées des composantes de courants drifters .

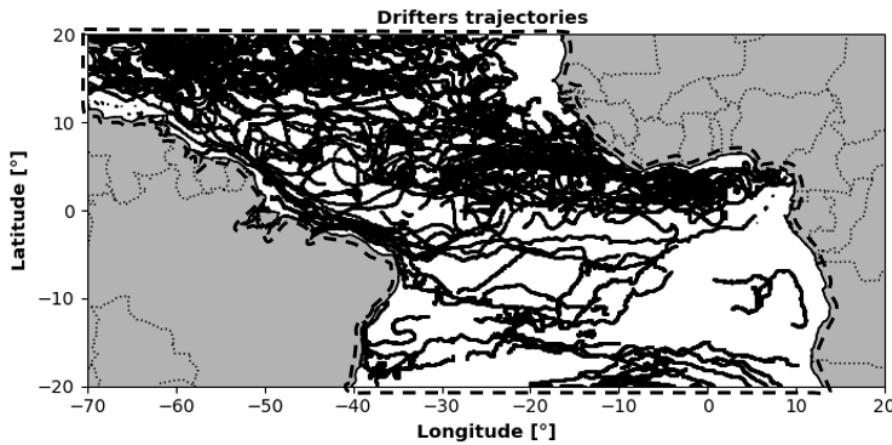


FIGURE 3.2 – Geographic outline (dashed box) of the analysis region. Drifter trajectories as shown during the period January 2019 to December 2023 were used for computing drifter velocities in the analysis. Number of drifters is 967.

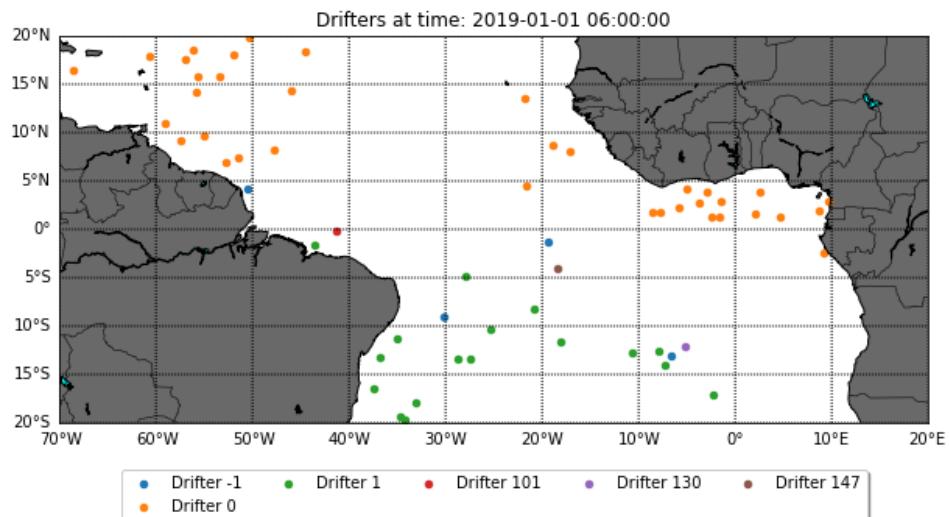


FIGURE 3.3 – Position des drifters à la date du 2019-01-01 06 :00 :00

Enfin, nous avons comparé les courants combinés (géostrophiques plus Ekman) du produit Globcurrent avec les courants filtrés des drifters pour évaluer leur concordance en utilisant des tests statistiques, tels que le calcul du coefficient de corrélation de Pearson, le coefficient de direction et l'erreur quadratique moyenne (RMSE), dont les expressions sont respectivement données par :

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2}$$

$$r = \frac{N \sum (x_i \hat{x}_i) - (\sum x_i)(\sum \hat{x}_i)}{\sqrt{[N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][N \sum \hat{x}_i^2 - (\sum \hat{x}_i)^2]}} ; \quad b = \frac{N \sum (x_i \hat{x}_i) - (\sum x_i)(\sum \hat{x}_i)}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

Où x_i est la donnée des bouées dérivantes, \hat{x}_i celle des produits satellitaires, N est le nombre de pixels, et i est l'indice du pixel.

Résultats, Analyses et Discussions

“Les découvertes scientifiques nous rappellent que le monde est plein de mystères à explorer et que chaque résultat ouvre la voie à une nouvelle compréhension.”

Albert Einstein

Dans ce chapitre, nous examinons la première partie des résultats de la recherche, en évaluant la qualité des courants de surface océanique des produits satellitaires à l'aide des données « AVISO » du système DUACS, disponibles via le service Copernicus Marine Service (CMEMS). La contribution du satellite SWOT sera abordée dans le [chapitre 5](#). Les bouées dérivantes, notamment les drifters du programme Global Drifter de la NOAA, sont utilisées pour valider les observations des produits satellitaires.

4.1 Validation des courants océaniques de surface issus des produits Globcurrents à l'aide des données de « Drifters »

Bien que les tourbillons et les oscillations inertielles soient tous deux liés à la dynamique des fluides et à la rotation de la Terre, ils diffèrent par leurs périodes. La période des oscillations inertielles est $\frac{2\pi}{f}$, où f est la fréquence de Coriolis ([Susan et al., 2005](#); [Persson, A., 2005](#)), tandis que les tourbillons n'ont pas de période unique définie et présentent des dynamiques plus complexes. Dans les sections suivantes, nous appliquerons une analyse combinée sur deux drifters : l'un avec des caractéristiques de tourbillon et l'autre avec des oscillations inertielles, puis nous conclurons par une synthèse pour l'ensemble des drifters.

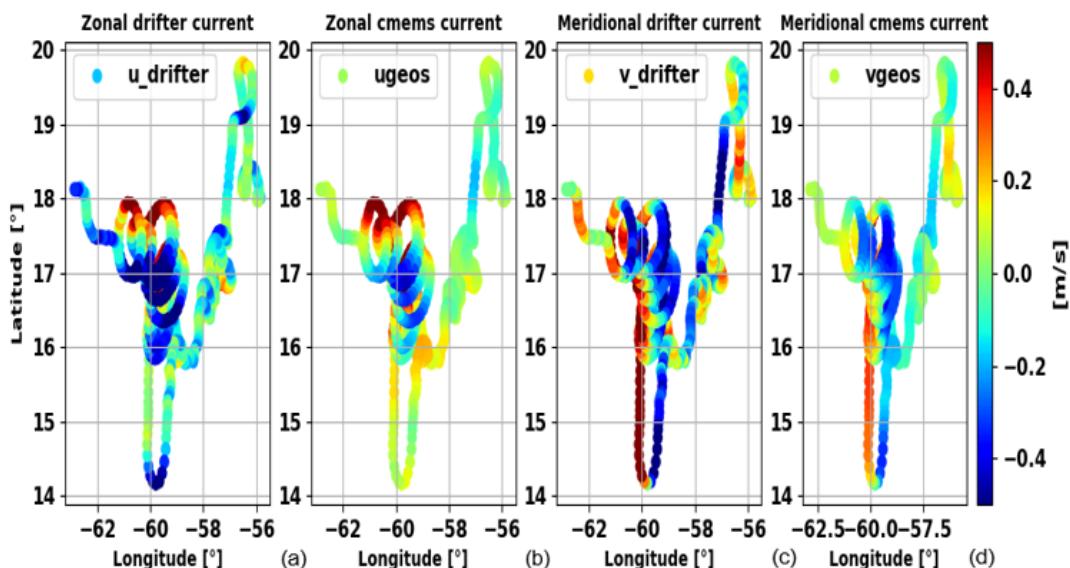
4.1.1 Analyse combinée des drifters : tourbillon vs oscillations inertielles

4.1.1.1 Analyse du drifter avec caractéristiques de tourbillon

Le drifter sélectionné est influencé par un courant associé à un tourbillon tout au long de sa trajectoire, avec un total de 813 observations collectées. La visualisation de ses trajectoires sur les champs de SSH et SST a révélé un tourbillon anticyclonique de surface, comme décrit par Chaigneau et al. (2008) et Assassi et al. (2016). En effet, le drifter se trouve dans une zone concave du champ de SSH, avec une température de surface d'environ 27°C, ce qui confirme la présence du tourbillon. Ce tourbillon, influencé par le courant antillais, a une amplitude de 1,5 m, un rayon de 13 à 40 km, et une énergie cinétique de 30 m²/s².

La Figure 4.1 montre que les courants mesurés par CMEMS sont globalement cohérents avec ceux du drifter, mais présentent des intensités faibles. Cette différence est en partie due à la résolution spatiale limitée de Cmems, qui est de 1/4°, ainsi qu'à l'absence des composantes agéostrophiques dans les courants fournis par Cmems. De plus, l'intensité négative des courants observée est attribuée à la présence du drifter dans une zone de courants d'ouest, considérés comme négatifs (Bourlet et al., 2008).

Pour améliorer la qualité des courants observée par les produits satellitaires, nous avons ajouté les composantes d'Ekman aux composantes zonales et méridionales. La Figure 4.2 illustre cette correction. Comme les courants mesurés par le drifter incluent des tourbillons, nous avons utilisé trois filtres pour l'extraction, et le filtre linéaire de Hanning, qui est celui qui donne les résultats les plus cohérents. Les résultats sont montrés à la Figure 4.3, et les évaluations des analyses sont présentées au Tableau 4.1.



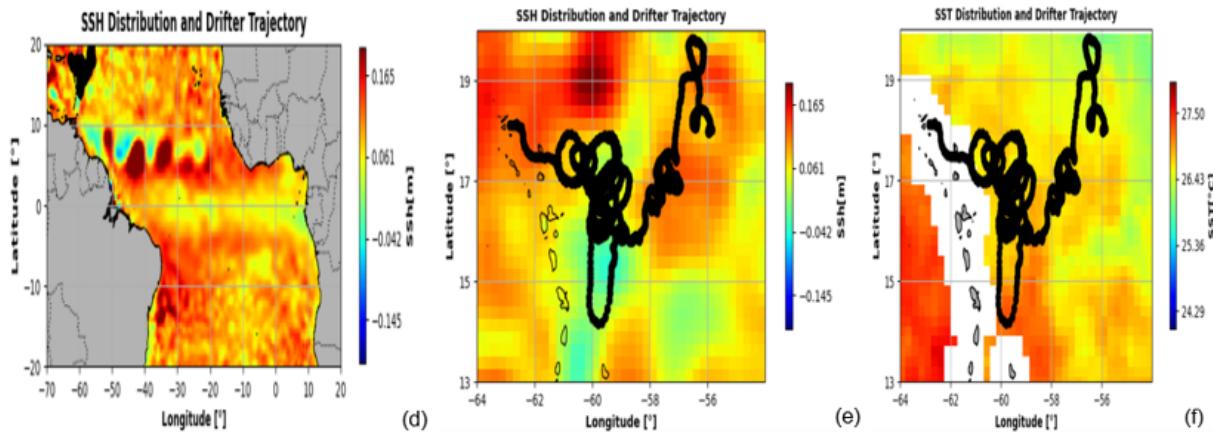
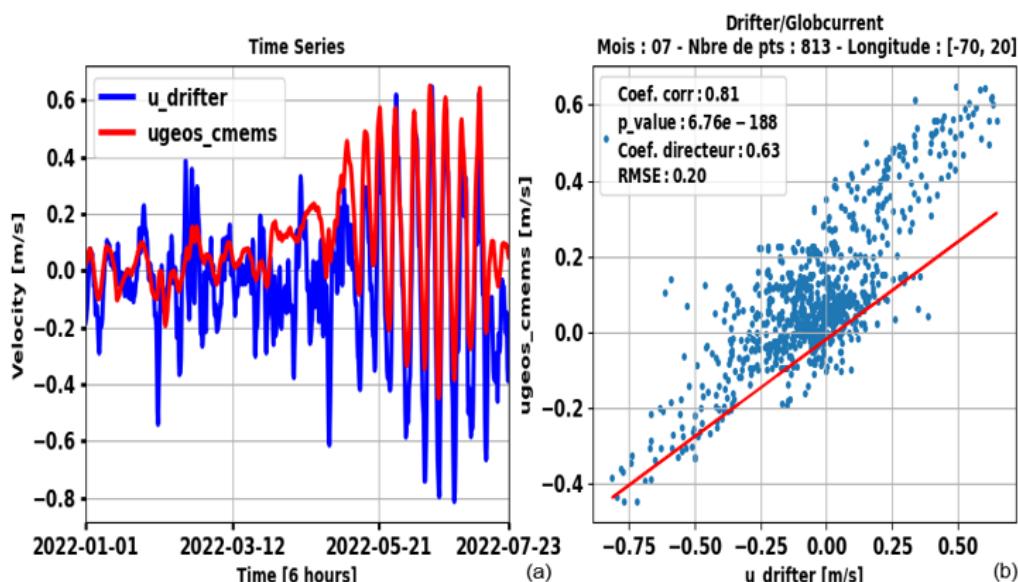


FIGURE 4.1 – Courants zonal et méridional du drifter (a, c), courants géostrophiques interpolés Aviso (b, d), distribution SSH et position du drifter (e, f), distribution SST (g).

La Figure 4.2 montre que les courants mesurés par les drifters du Global Drifter Program sont fortement corrélés avec les courants géostrophiques de Globcurrent, avec des coefficients de corrélation de 0.81 pour le zonal et 0.82 pour le méridional, et des p-values très faibles. Les coefficients directeurs sont de 0.63 pour le zonal et 0.52 pour le méridional, tandis que les RMSE sont de 0.20 m/s pour le zonal et 0.16 m/s pour le méridional.

Ces résultats indiquent que les modèles géostrophiques prédisent bien les courants mesurés, bien qu'ils ne tiennent pas compte de toutes les composantes du courant. Après l'intégration du courant d'Ekman et l'application du filtre de Hanning, les statistiques montrent une amélioration notable. Les prévisions pour le courant zonal ont une corrélation de 0.81, avec une p-value faible et un RMSE de 0.14 m/s. Pour le courant méridional, la corrélation est de 0.87, également avec une p-value faible et un RMSE de 0.11 m/s.



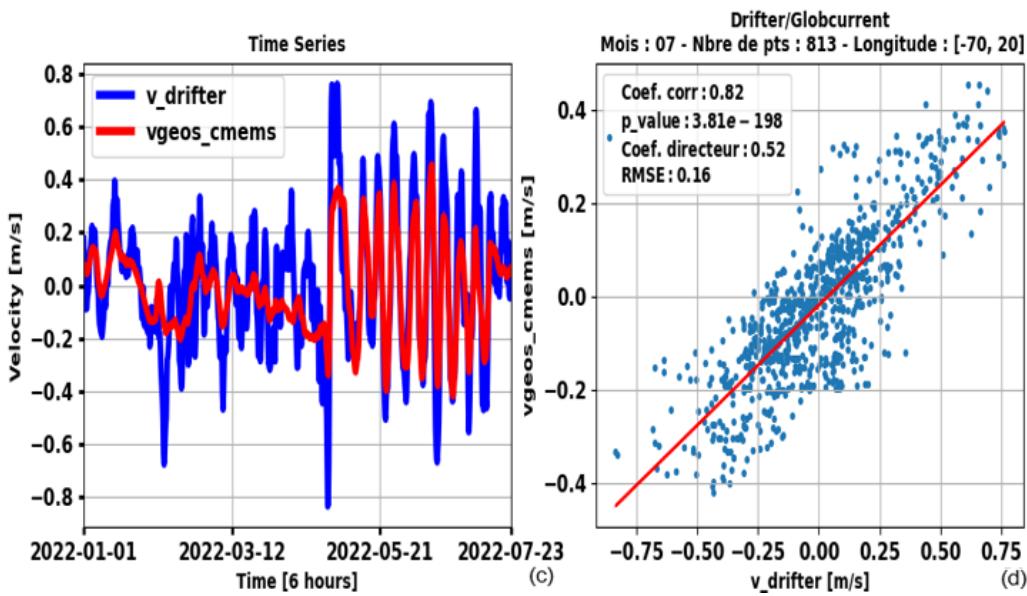


FIGURE 4.2 – Comparaison des vitesses dérivées par dériveurs et satellites : séries temporelles (a, c) et analyse de corrélation, régression et RMSE (b, d).

En somme, ces ajustements ont considérablement amélioré la précision des prévisions, surtout pour les courants méridionaux (voir Figure 4.3).

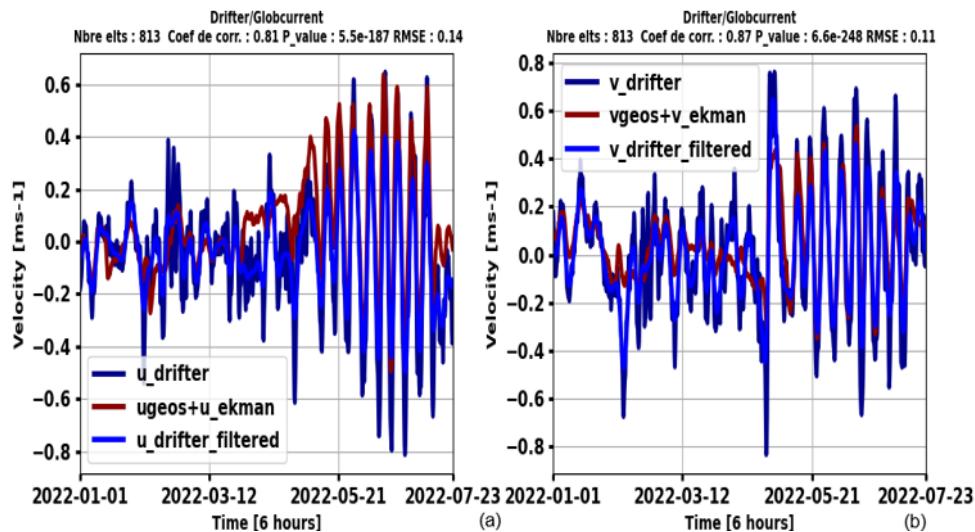


FIGURE 4.3 – Comparaison statistique des vitesses dérivées des drifters et des satellites pour (a) les courants zonaux et (b) les courants méridionaux.

Les filtres utilisés dans cette partie, bien que conçus pour éliminer les fréquences inertielles, sont particulièrement efficaces pour atténuer les tourbillons et autres perturbations dans les données des vitesses des drifters. Ils réduisent les fréquences élevées tout en conservant les composantes significatives de basse fréquence, ce qui améliore la qualité des données et permet une analyse plus précise des mouvements océaniques.

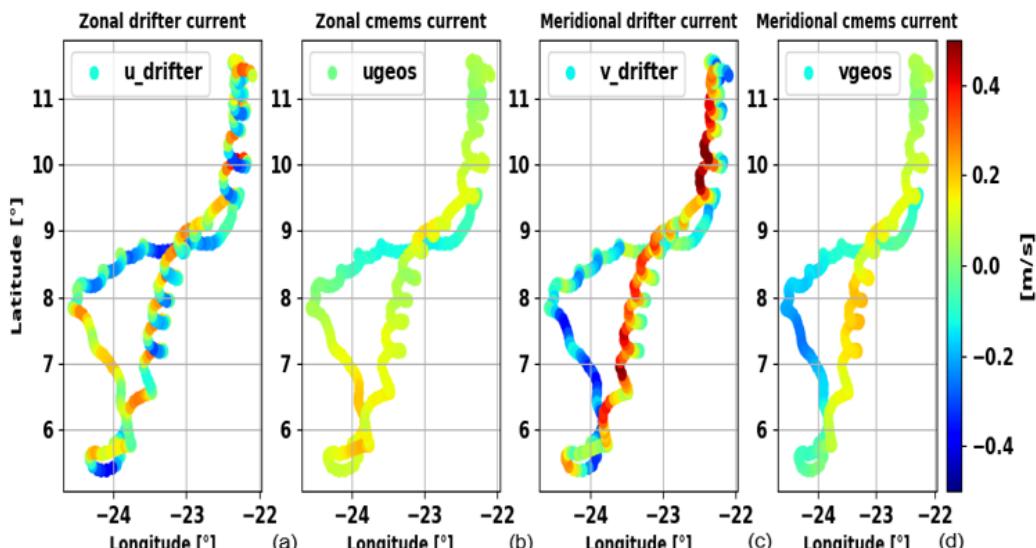
TABLE 4.1 – Tableau comparant les vitesses de Glocurrent en surface aux vitesses d'un drifter pris dans un tourbillon à 15 m dans la région 20°N-20°S et 70°W-20°E.

| Variables | Coef. corr | P-value | Coef. Directeur | RMSE |
|--|------------|-----------|-----------------|------|
| (ugeos, u-drifter) | 0.81 | 6.76e-188 | 0.63 | 0.20 |
| (vgeos, v-drifter) | 0.82 | 3.81e-198 | 0.52 | 0.16 |
| (ugos+ue, u-drifter) | 0.81 | 4.29e-186 | 0.64 | 0.17 |
| (vgeos+ve, v-drifter) | 0.84 | 4.24e-215 | 0.53 | 0.16 |
| (ugeos+ue, Hanning filter u-filtered) | 0.81 | 5.51e-187 | 0.6(| 0.14 |
| Clemem filter | 0.00 | 0.92 | -1.54 | 4401 |
| Median filter | 0.81 | 1.03 | 0.65 | 0.17 |
| (vgeos+ve, Hanning filter v-filtered) | 0.87 | 6.59e-248 | 0.75 | 0.11 |
| Clemem filter | -0.03 | 0.47 | -6.87 | 6243 |
| Median filter | 0.84 | 5.97 | 0.53 | 0.16 |

En conclusion, le Tableau 4.1 montre que les vitesses mesurées par Glocurrent en surface et celles de NOAA à 15 mètres pour notre drifter entre 20N-20S et 70W-20E sont mieux alignées avec des données filtrées. Les modèles combinant géostrophie et Ekman, et utilisant des filtres, offrent une meilleure corrélation et précision. Le filtre linéaire Hanning est le plus performant avec une corrélation de 0.87 et un RMSE de 0.11, tandis que les filtres linéaire Ubelmann et non linéaire Median présentent des résultats plus variables.

4.1.1.2 Analyse du drifter avec oscillations inertielles

Le drifter sélectionné est influencé par un courant associé à l'inertie tout au long de sa trajectoire, avec un total de 404 observations collectées. Sa période inertuelle, calculée à



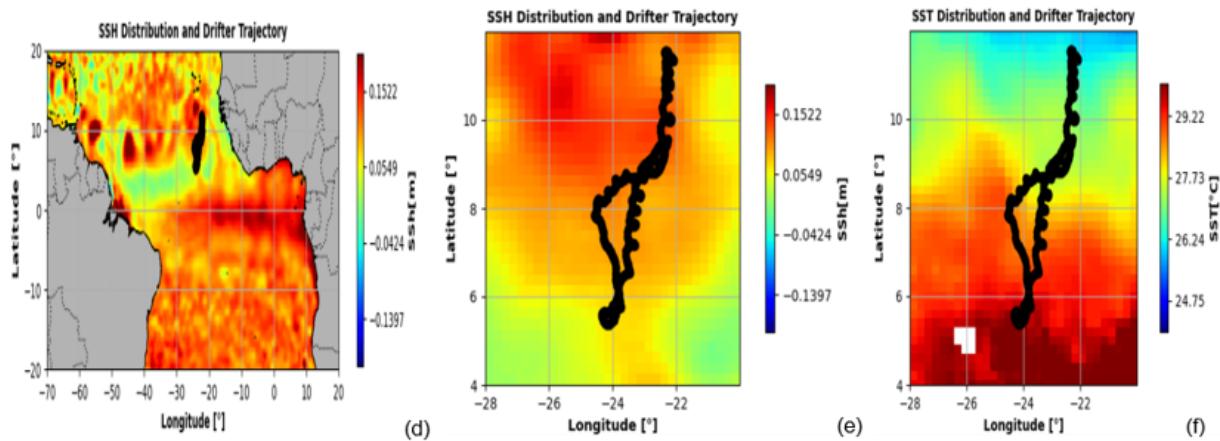
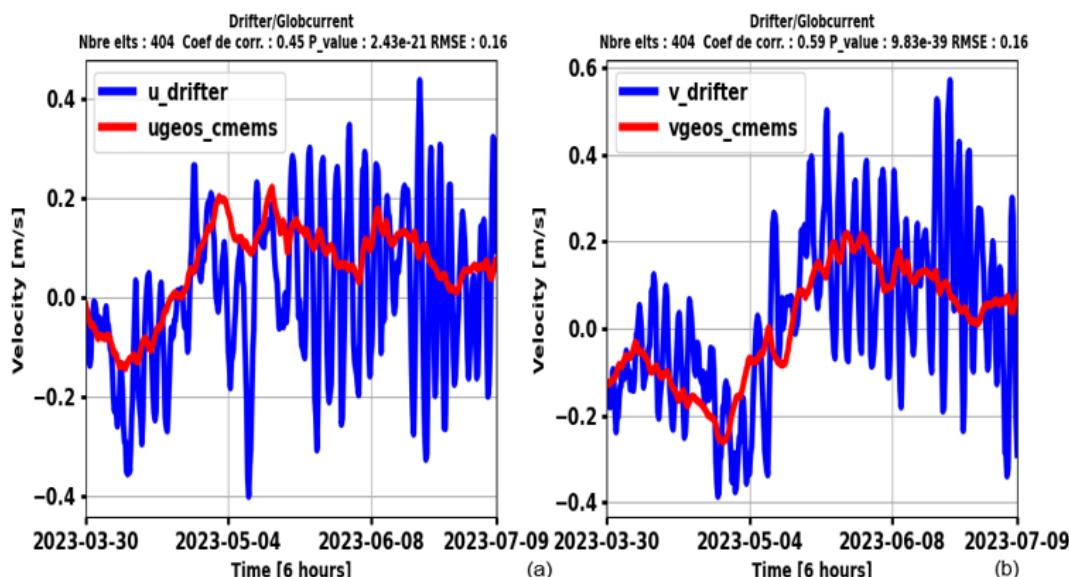


FIGURE 4.4 – Courants zonal et méridional du drifter (a, c), courants géostrophiques interpolés Aviso (b, d), distribution SSH et position du drifter (e, f), distribution SST (g).

86 heures, concorde avec les mesures par FFT ([Susan et al., 2005](#) ; [Persson, A., 2005](#)). La trajectoire du drifter montre une concentration de SSH le long du diamètre du tourbillon, comme indiqué à la [Figure 4.4-\(b\)](#), confirmant l'influence des composantes inertielles sur les courants mesurés par les drifters .

La [Figure 4.4](#) montre que, bien que les courants mesurés par Cmems soient cohérents avec ceux des drifters, leur intensité est inférieure. Cette différence est en partie due aux composantes additionnelles des courants des drifters, telles que les effets d'Ekman, inertielles et cyclogéostrophiques, ainsi qu'à la résolution spatiale limitée de Cmems, qui est de $1/4^\circ$. De plus, l'intensité positive observée est attribuable à la présence du drifter dans une zone de courants d'est, considérés comme positifs ([Bourlet et al., 2008](#)).



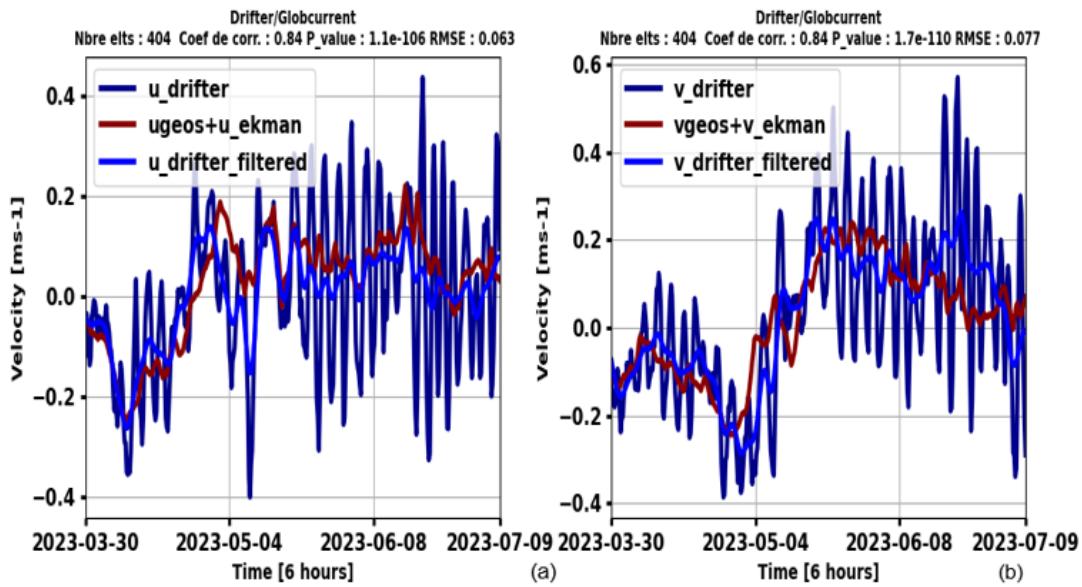


FIGURE 4.5 – Comparaison statistique des vitesses dérivées des drifters et des satellites pour (a, c) les courants zonaux et (b, d) les courants méridionaux.

Pour améliorer la précision des courants mesurés par satellite, nous avons intégré les composantes d’Ekman aux composantes zonales et méridionales. Les courants obtenus par drifter, en tenant compte de l’inertie, ont été filtrés avec trois types de filtres, dont un filtre linéaire de Ubelmann, qui s’est révélé aussi efficace que le filtre de Hanning pour lisser les données et minimiser les fuites spectrales. Les résultats et les analyses sont illustrés respectivement à la Figure 4.7 et au Tableau 4.2.

TABLE 4.2 – Tableau comparant les vitesses de Glocurrent en surface aux vitesses d’un drifter soumis à des oscillations inertielles à 15 m dans la région 20°N-20°S et 70°W-20°E.

| Variables | Coef. corr | P-value | Coef. Directeur | RMSE |
|--|------------|-----------|-----------------|-------|
| (ugeos, u-drifter) | 0.45 | .43e-21 | 0.25 | 0.16 |
| (vgeos, v-drifter) | 0.59 | 9.83e-39 | 0.38 | 0.16 |
| (ugeos+ ue, u-drifter) | 0.47 | 4.41e-23 | 0.31 | 0.15 |
| (vgeos+ve, v-drifter) | 0.60 | 1.84e-40 | 0.38 | 0.16 |
| (ugeos+ue, Hanning filter u-filtered) | 0.84 | 1.05e-106 | 1.00 | 0.063 |
| Clemem filter | 0.83 | 2.47e-104 | 1.74 | 0.073 |
| Median filter | 0.48 | 1.57 | 0.32 | 0.14 |
| (vgeos+ve, Hanning filter v-filtered) | 0.84 | 1.66e-110 | 0.75 | 0.077 |
| Clemem filter | 0.83 | 1.08e-105 | 1.34 | 0.076 |
| Median filter | 0.61 | 5.15 | 0.40 | 0.16 |

En conclusion, le Tableau 4.2 montre que les composantes des vitesses mesurées par le

produit Globcurrent s'alignent mieux avec ceux de la NOAA lorsqu'on utilise les filtres Hanning et Clemem, avec des coefficients de corrélation de 0.84 et des RMSE faibles (0.063 et 0.077 respectivement). Le filtre non linéaire médian donne des résultats moins cohérents avec des coefficients de corrélation plus faibles (0.48 et 0.61) et des RMSE plus élevés (0.14 et 0.16). Les ajustements pour les effets d'Ekman améliorent la précision, notamment lorsqu'ils sont combinés avec les filtres Hanning et Ubelmann.

4.2 Synthèse des résultats pour l'ensemble des drifters

Dans cette section, nous appliquons la méthode de l'analyse combinée à l'ensemble de nos 967 drifters sur une période de 5 ans. La Figure 4.6 illustre que les courants mesurés par Cmems sont cohérents avec ceux des drifters, mais leur intensité démeure inférieure, en raison des effets agéostrophiques sur les drifters et de la résolution spatiale limitée de Cmems ($1/4^\circ$). La prédominance des courants d'intensité négatifs est liée à la présence dominante de courants d'ouest dans l'Atlantique tropical, considérés comme négatifs (Bourlet et al., 2008). Les vitesses initiales des composantes inertielles sont montrées à la Figure 4.7, et les conclusions globales sont résumées dans le Tableau 4.3.

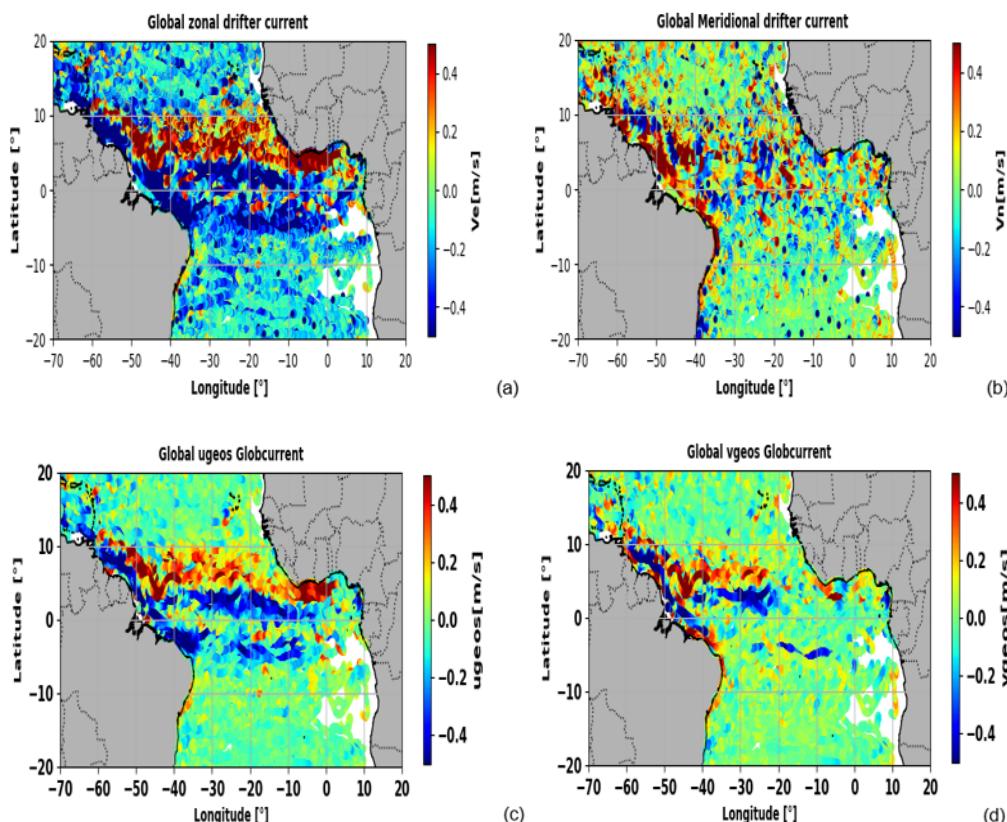


FIGURE 4.6 – Courants zonal et méridional drifters (a, b), courants géostrophiques interpolés Aviso (c, d).

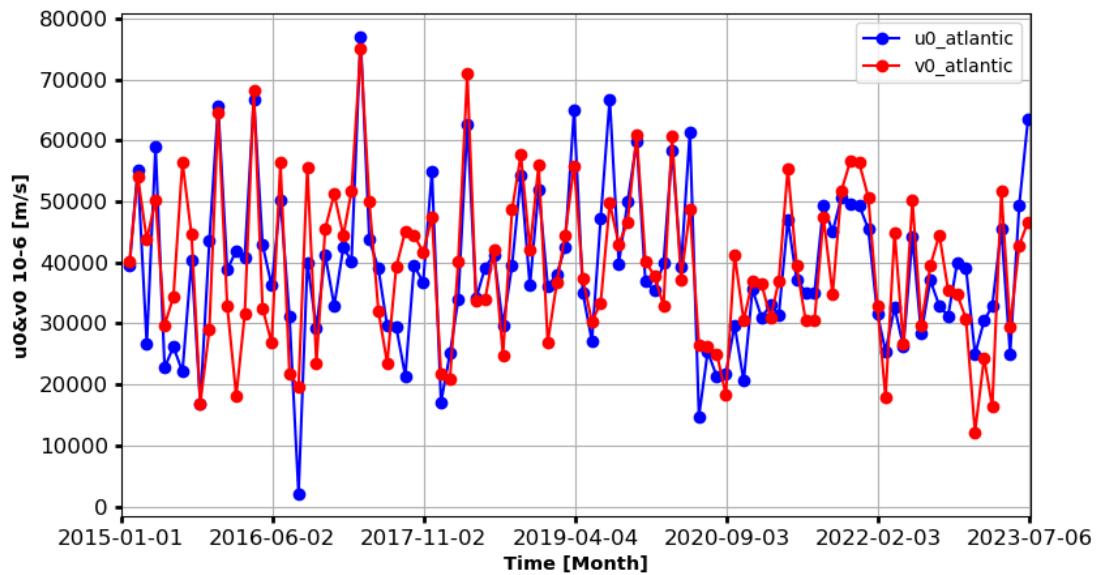
FIGURE 4.7 – Vitesse initiale inertielle : zonale u_0 en (bleu) et méridienne v_0 en (rouge).

TABLE 4.3 – Tableau comparant les vitesses de Glocurrent en surface aux vitesses de l'ensemble des drifters à 15 m dans la région 20°N-20°S et 70°W-20°E.

| Variables | Coef. corr | P-value | Coef. Directeur | RMSE |
|---------------------------|------------|---------|-----------------|------|
| (ugeos, u-drifter) | 0.69 | 0.00 | 0.47 | 0.17 |
| (vgeos, v-drifter) | 0.44 | 0.00 | 0.31 | 0.17 |
| (ugeos+ue, u-drifter) | 0.77 | 0.00 | 0.60 | 0.15 |
| (vgeos+ve, v-drifter) | 0.50 | 0.00 | 0.36 | 0.15 |
| (ugeos+ue, Hanning filter | 0.83 | 0.00 | 0.72 | 0.12 |
| u-filtered) Clemem filter | 0.71 | 0.00 | 1.08 | 0.13 |
| Median filter | 0.78 | 0.00 | 0.61 | 0.14 |
| (vgeos+ve, Hanning filter | 0.60 | 0.00 | 0.53 | 0.12 |
| v-filtered) Clemem filter | 0.45 | 0.00 | 0.58 | 0.11 |
| Median filter | 0.51 | 0.00 | 0.37 | 0.15 |

La Figure 4.7 montre que les composantes initiales des vitesses inertielles sont en moyenne de 0,04 m/s, avec des valeurs maximales autour de 0,08 m/s, en raison de l'influence des continents sur la circulation de l'eau. Le Tableau 4.3 révèle que le filtre de Hanning améliore le plus la qualité des courants de surface des drifters, avec des gains de 14 % pour la composante zonale et 16 % pour la composante méridionale. Les filtres linéaire Ubelmann et médian non linéaire montrent également des améliorations, mais sont légèrement moins efficaces que le filtre de Hanning.

Contribution du satellite SWOT dans l'étude

Ce chapitre décrit la conception et les objectifs du satellite SWOT et évalue son impact sur les courants océaniques de surface en comparant ses données avec celles d'autres satellites et des mesures in-situ. Les données SWOT utilisées proviennent des 99 jours de répétition quotidienne en mode Fast Sampling. Les données satellitaires incluent la hauteur de mer et les courants géostrophiques issus du produit Globcurrent d'AVISO et disponible sur copernicus marine service (CMEMS), tandis que les comparaisons in-situ se basent sur les courants fournis par le programme Global Drifter de la NOAA.

5.1 Conception et Objectifs du Satellite SWOT

Le satellite SWOT (Surface Water Ocean Topography), lancé en 2022, est le fruit d'une collaboration entre le CNES et la NASA, avec des contributions des agences spatiales britannique et canadienne (Fu et al., 2009 ; Durand et al., 2010 ; Morrow et al., 2019).

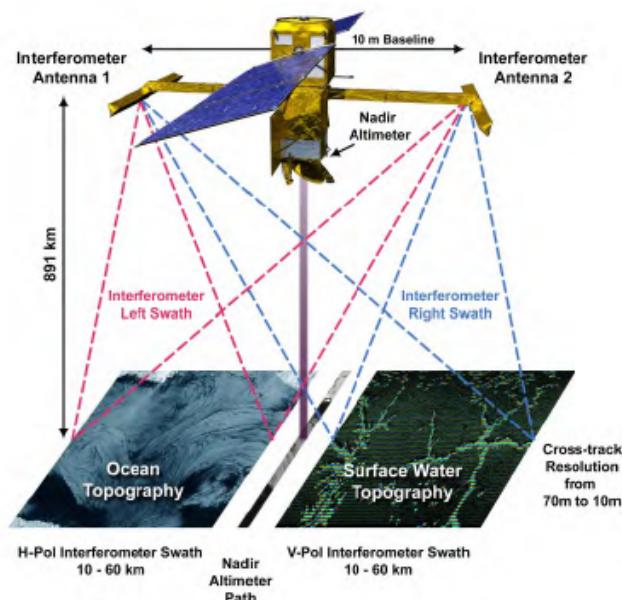


FIGURE 5.1 – Principe de mesure du satellite SWOT. Crédits : NASA-JPL

Equipé d'un radar interféromètre en bande Ka (KaRIn) (Durand et al., 2010 ; Fu et Ubelmann, 2014) comme le montre la Figure 5.1, il mesure la hauteur de la surface de la mer (SSH) en deux dimensions avec une résolution spatiale sans précédent, soit 2km. Ce radar offre une résolution effective d'environ 15-30 km, grâce à une mesure 2D et un bruit instrumental plus faible que les altimètres nadir conventionnels (Dufau et al., 2016 ; Wang et al., 2019). Le satellite capture des données sur deux fauchées de 50 km avec un écart de 20 km autour de la trajectoire nadir. Son cycle de répétitivité est de 21 jours, avec un temps de revisite variant d'environ 10 jours à l'équateur à quelques jours aux pôles. SWOT vise à améliorer la couverture globale de la variabilité méso-échelle et sous-méso-échelle de l'océan (Wang et al., 2019).

5.2 Diagnostic d'évaluations

La comparaison entre les données de SWOT, celles du produit Globcurrent d'AVISO, et les mesures in-situ du programme Global Drifter de la NOAA utilise le test de corrélation de Pearson, le coefficient directeur, et l'Erreur Quadratique Moyenne (RMSE). Elle se fait en deux étapes : d'abord, les courants géostrophiques d'AVISO sont comparés à ceux estimés via SWOT, puis les courants géostrophiques de SWOT, auxquels une composante d'Ekman a été ajoutée, sont comparés à ceux du Global Drifter, après avoir filtré les oscillations inertielles. Pour effectuer ces comparaisons, il est nécessaire de mettre toutes les données sur une grille commune, par exemple celles de SWOT. Ensuite, nous interpolons spatialement les données SWOT et AVISO aux positions des drifters.

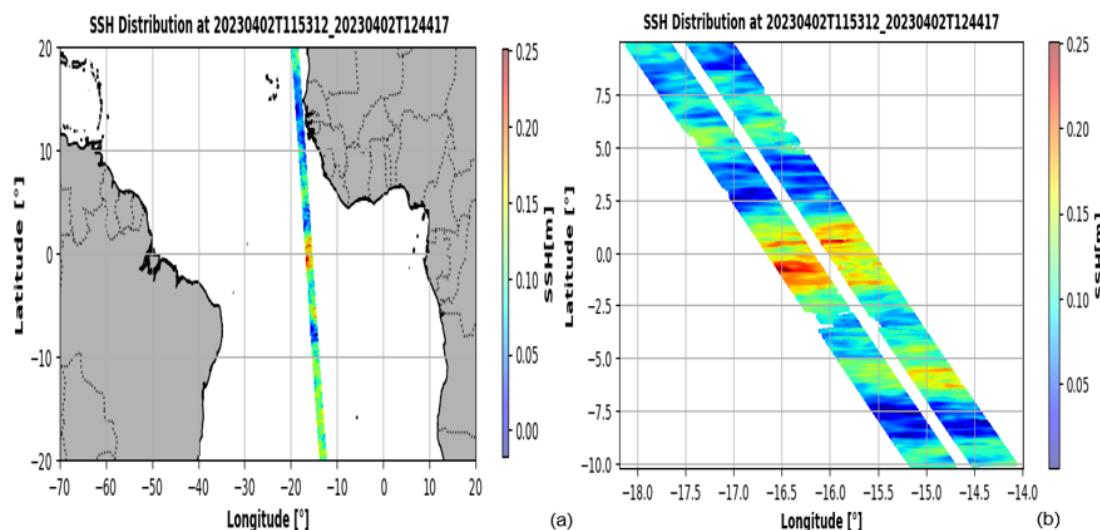


FIGURE 5.2 – Projection de la hauteur de mer (SSH) de SWOT dans l'Atlantique tropical (a) et aperçu de sa trace (b).

5.2.1 Comparaison des courants géostrophiques d'AVISO avec ceux de SWOT

. Les interpolations des courants géostrophiques d'AVISO et de SWOT sont illustrées à la [Figures 5.3](#). SWOT révèle une forte influence des variations à petite échelle, contrairement à AVISO. Un lissage spatial de $1/2^\circ$ montre que les courbes vertes de la [Figures 5.4](#), représentant les courants après filtrage de la petite échelle, reproduisent relativement bien les résultats de CMEMS, indiquant une bonne concordance à grande échelle. Cependant, SWOT fournit des informations supplémentaires à petite échelle, et il est crucial de vérifier la réalité de ces détails fins en les comparant aux données des bouées dérivantes. À grande échelle, SWOT et CMEMS sont cohérents, avec une corrélation maximale autour de 1° et correcte à partir de $1/2^\circ$, mais se dégradant en dessous. Cela suggère que la haute fréquence dans SWOT prédomine sur le signal de basse fréquence, tandis que la variabilité spatiale à grande échelle de CMEMS devient plus visible après filtrage. La comparaison avec les bouées dérivantes permettra de confirmer la précision des détails fins de SWOT et son amélioration par rapport à CMEMS.

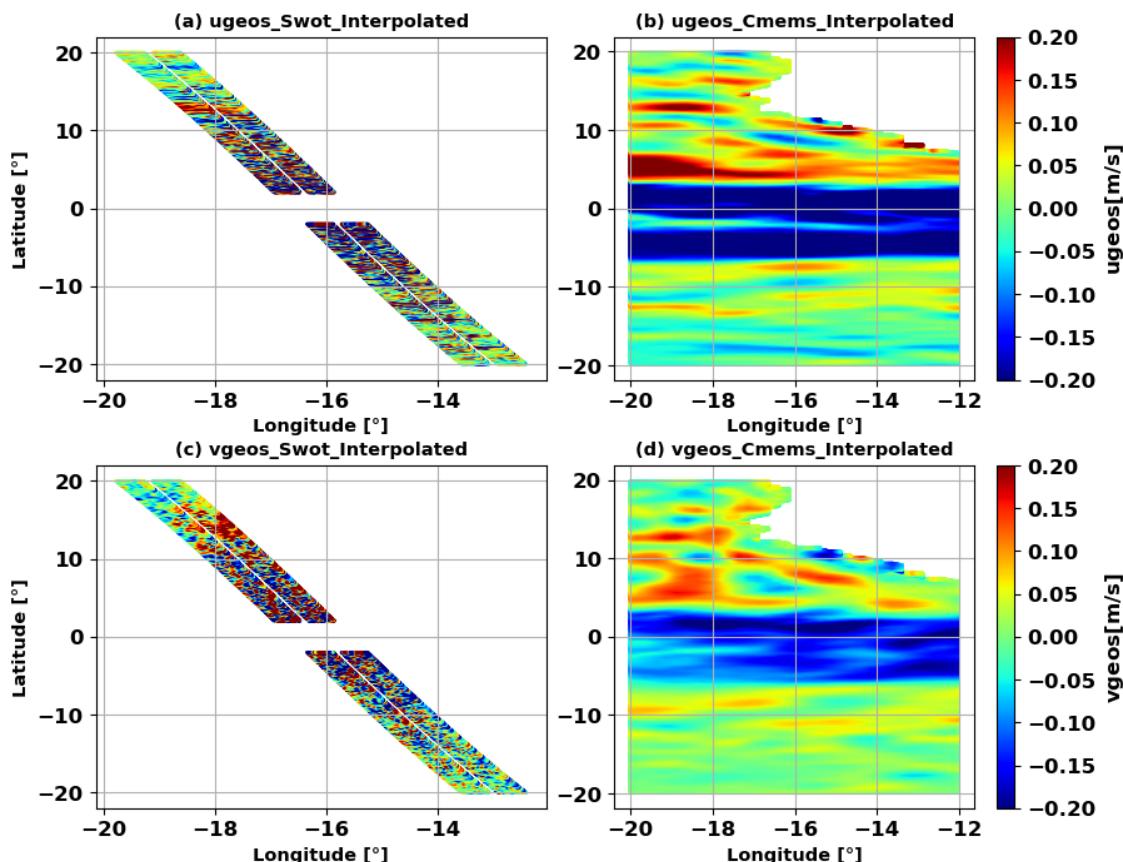


FIGURE 5.3 – Interpolation des courants géostrophiques SWOT et AVISO sur la grille SWOT : Cas zonal (a, b) et méridional (c, d).

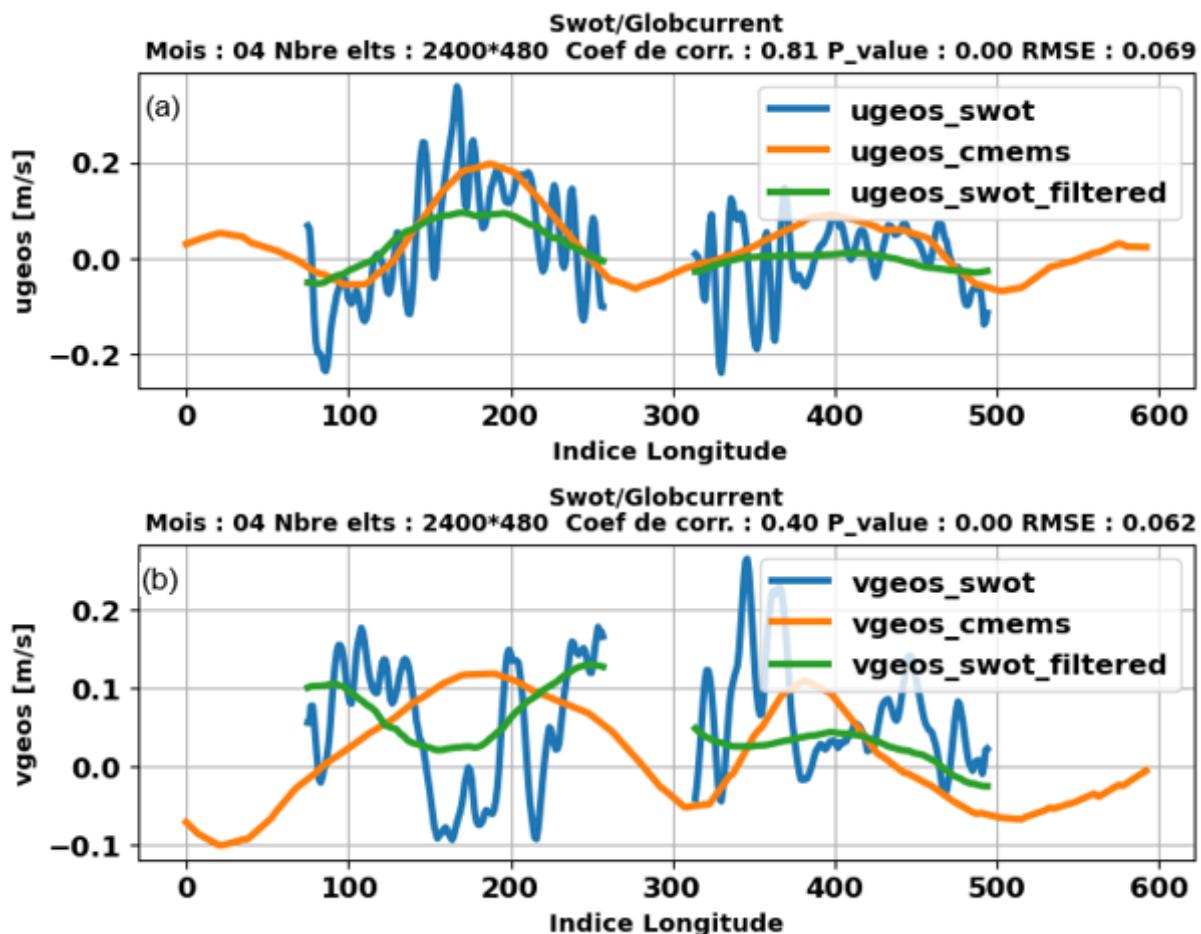


FIGURE 5.4 – Analyse statistique des corrélations spatiales entre les courants géostrophiques interpolés SWOT et AVISO : Cas zonal (a) et méridional (b).

5.2.2 Comparaison des courants géostrophiques de SWOT et du Global Drifter.

Pour comparer les deux sources de donnée de courants, nous commençons par visualiser les trajectoires des drifters et les traces du satellite SWOT. La Figure 5.5 montre que les mesures des courants effectuées par SWOT et AVISO coïncident en certains endroits, ce qui soulève la question de la qualité des mesures des courants de surface océaniques entre les deux produits. Pour notre analyse, nous avons utilisé un drifter couvrant toute la période d'étude, en parallèle avec les données des satellites SWOT et AVISO. La Figure 5.6 illustre la superposition de la trajectoire du drifter sur les champs de courant de SWOT et AVISO.

Les séries temporelles des Figure 5.7 et Figure 5.8 montrent que l'information à petite échelle dans SWOT n'est pas forcément réaliste. Cependant, après un filtrage temporel

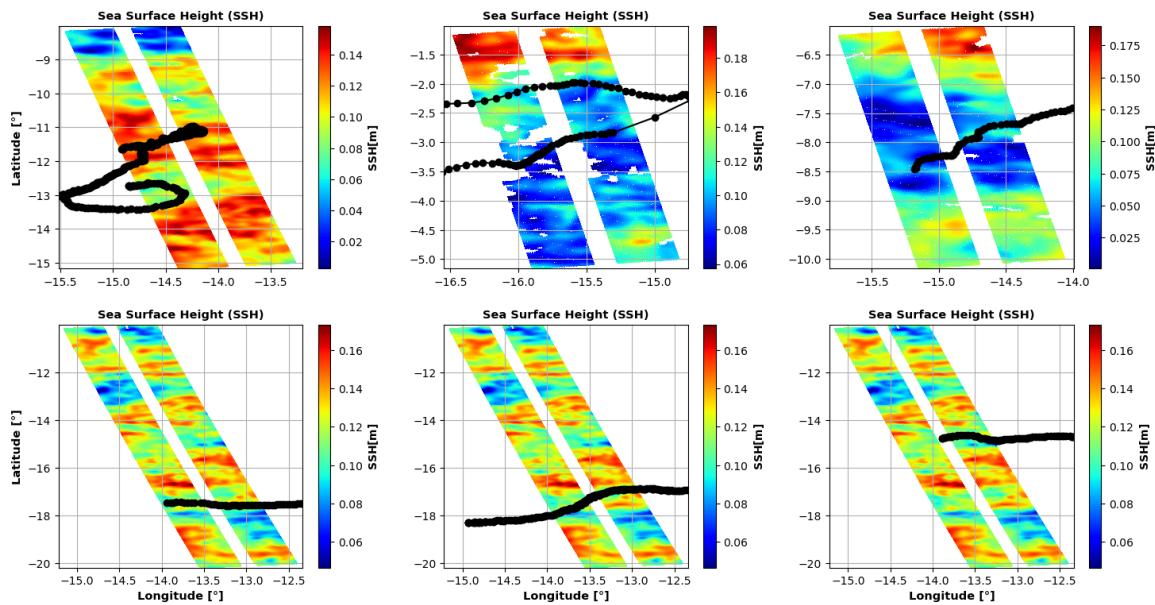


FIGURE 5.5 – Trace SWOT de la journée du 02 avril 2023 et trajectoire des drifters

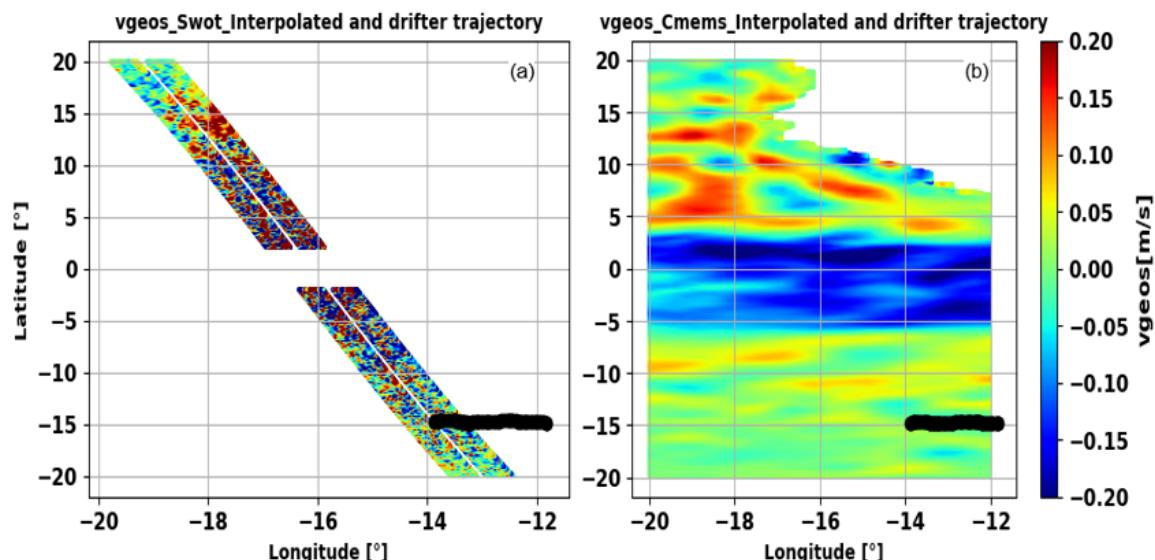


FIGURE 5.6 – Trajectoire des drifters superposée aux champs de vitesses méridiennes de SWOT et CMEMS

de 5 jours, comme indiqué par la courbe rouge standard de la Figures 5.8, SWOT offre une meilleure information à la méso-échelle par rapport à CMEMS, surtout pour la composante zonale, où la résolution est suffisante. En revanche, la composante méridionale est moins précise en raison d'une couverture insuffisante. En effet, cette composante est dérivée de la hauteur spécifique de la mer (SSH) mesurée selon la longitude, et comme la bande de mesure du satellite SWOT est étroite mais longue, le lissage est effectué sur une large zone selon la latitude, ce qui diminue la précision de cette composante.

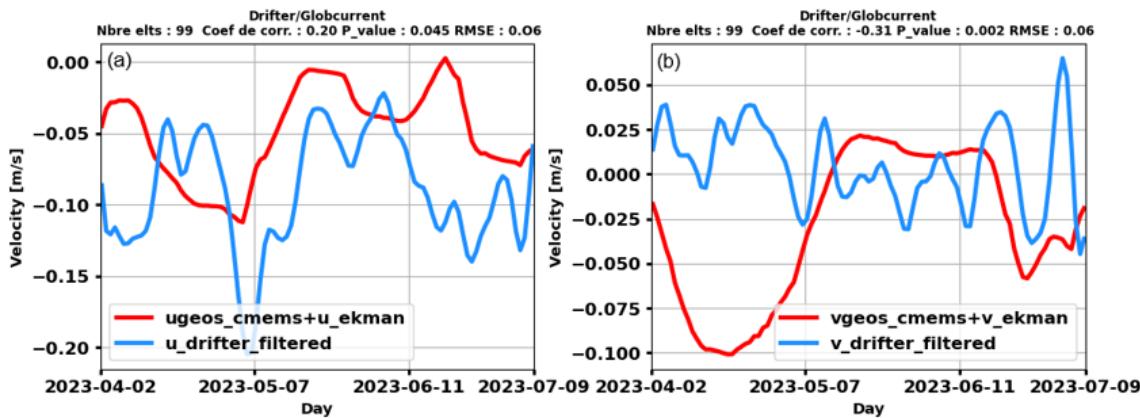


FIGURE 5.7 – Analyse des séries temporelles entre les courants géostrophiques Cmems et les courants Drifters : Cas zonal (a) et méridional (b).

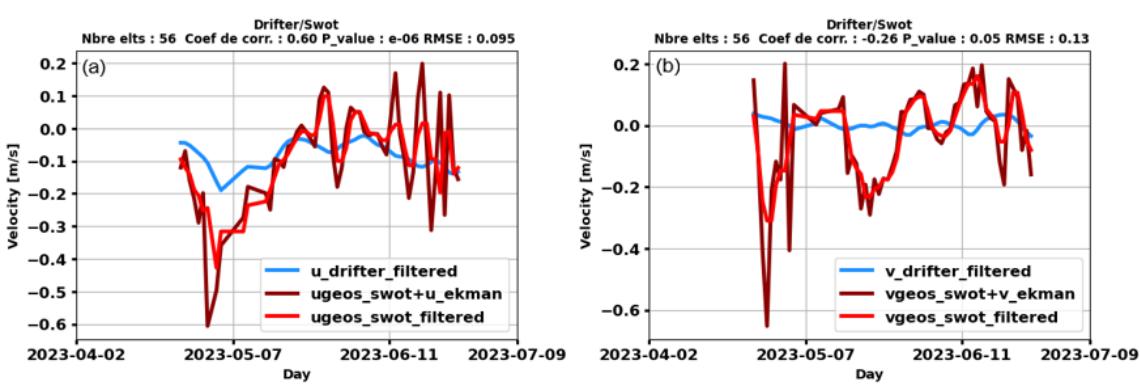


FIGURE 5.8 – Analyse des séries temporelles entre les courants géostrophiques SWOT et les courants Drifters : Cas zonal (a) et méridional (b).

5.3 Conclusion

En conclusion, l’analyse comparée des courants géostrophiques obtenus par SWOT et AVISO, et validée par les mesures in-situ du Global Drifter, révèle plusieurs points clés. La comparaison initiale des courants géostrophiques montre que SWOT et CMEMS sont cohérents à grande échelle, bien que SWOT capte mieux les variations à petite échelle. Les tests statistiques indiquent que les petites échelles observées dans SWOT peuvent ne pas être entièrement réalistes. Cependant, après filtrage temporel, SWOT fournit des informations améliorées à la méso-échelle par rapport à CMEMS, particulièrement pour la composante zonale. En revanche, la précision de la composante méridienne est réduite en raison d’une couverture insuffisante de la largeur de la fauchée.

Conclusion et recommandations

Cette étude sur les composantes géostrophiques et agéostrophiques des courants marins, réalisée à travers l'analyse combinée des données de bouées dérivantes et des produits satellitaires, a permis d'apporter des éclaircissements significatifs sur la dynamique des courants de surface. En utilisant les données du Global Drifter Program de la NOAA et les produits satellitaires tels que Globcurrent d'AVISO et NRT SWOT KaRIn & nadir, nous avons mis en évidence les avantages et les limites de ces différentes sources de données. Les résultats montrent que l'altimétrie AVISO fournit une description eulérienne des courants géostrophiques à basse résolution. Les données SWOT sont cohérentes avec AVISO à basse résolution et apportent des informations à plus petite échelle. Nous avons évalué l'apport de cette petite échelle en comparant les données SWOT aux données drifters. Pour cela il a fallu prendre en compte diverses composantes agéostrophiques (filtrage des oscillations d'inertie pour les drifters et ajout d'une composante d'Ekman aux vitesses géostrophiques issues de SWOT). Les données SWOT, après un filtrage spatial et temporel, ont montré une amélioration importante pour la composante zonale mais limitée pour la composante méridionale. Ceci a été interprété comme étant lié aux caractéristiques spécifiques de la trace SWOT.

Une partie importante de ce travail a reposé sur le développement de programmes permettant le filtrage spatial et temporel des données. Il a en particulier été montré que les oscillations inertielles ont une signature importante sur les courants des drifters et il est nécessaire de les filtrer. Le filtre linéaire de Hanning s'est ainsi révélé particulièrement efficace pour améliorer la qualité des courants de surface issus des drifters, avec des améliorations significatives pour l'estimation des composantes géostrophiques zonales et méridionales.

Ces résultats soulignent la nécessité de perfectionner les méthodes de filtrage des données marines en réduisant les erreurs des techniques actuelles, d'optimiser les données SWOT en élargissant la largeur des fauchées pour mieux mesurer la composante méridienne, et d'exploiter davantage les données des drifters pour valider les composantes de vitesse SWOT.

Bibliographie

- [1] Assassi, C., Morel, Y., Vandermeirsch, F., Chaigneau, A., Pegliasco, C., Morrow, R., Colas, F., Fleury, S., Carton, X., Klein, P., & Cambra, R. An index to distinguish surface- and subsurface-intensified vortices from surface observations. *Journal of Physical Oceanography*, 46(8), 2529–2552. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-15-0122.1> (2016).
- [2] Bourles, B. Cours d'introduction à l'océanographie physique, MASTER2 « Océanographie Physique et Applications», version 2 (novembre 2008), Chap. 4, pp. 50-64, Chap. 5, pp. 90-96, pp. 100-109. (2008).
- [3] Brock, F. V., A nonlinear filter to remove impulse noise from meteorologicadla ta,J . Atmos. OceanicT echnol.3, , 52-58, (1986).
- [4] Chelton, D. B., M. G. Schlax, and R. M. Samelson. Global obser-vations of nonlinear mesoscale eddies. *Prog. Oceanogr.* 91 : 167–216. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2011.01.002> (2011).
- [5] Chaigneau, A., Gisolme, A., & Grados, C. Mesoscale eddies off Peru in altimeter records : Identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns. *Progress in Oceanography*, 79, 106–119. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.10.013> (2008).
- [6] Daniault, N. Cours Océanographie physique, Ecole Navale, Université de Bretagne Occidentale, p. 79, p.6. (2005).
- [7] Dohan, K., and N. Maximenko. Monitoring ocean currents with satellite sensors. *Oceanography* 23 : 94–103. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2010.08> (2010).
- [8] Dufau, C., Orsztynowicz, M., Dibarboire, G., Morrow, R., and Traon, P.-Y. L. Mesoscale resolution capability of altimetry : Present and future. *J. Geophys. Res. Oceans*, 121, 4910–4927. <https://doi.org/10.1002/2015JC010904> (2016).
- [9] Durand, M., Fu, L., Lettenmaier, D. P., Alsdorf, D. E., Rodriguez, E., and Esteban-Fernandez, D. The Surface Water and Ocean Topography Mission : Observing Ter-restrial Surface Water and Oceanic Submesoscale Eddies. *Proc. IEEE*, 98, 766–779. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2043031> (2010).
- [10] Durran, D. R. Is the Coriolis force really responsible for the inertial oscillation ? . *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74(11), 2179-2184. (1993).

- [11] Fu, L.-L., Alsdorf, D., Rodriguez, E., Morrow, R., Mognard, N., Lambin, J., Vaze, P., and Lafon, T. The SWOT (Surface Water and Ocean Topography) Mission : Spaceborne Radar Interferometry for Oceanographic and Hydrological Applications. (2009a).
- [12] Fu, L.-L., Alsdorf, D., Rodriguez, E., Morrow, R., Mognard, N., Lambin, J., Vaze, P., and Lafon, T. The SWOT (Surface Water and Ocean Topography) Mission : Spaceborne Radar Interferometry for Oceanographic and Hydrological Applications. (2009b).
- [13] Holton, J. R. Introduction to Dynamic Meteorology, 3rd Ed. Academic Press, 511 pp. (1992).
- [14] Hermozo, L. L'estimation de la correction troposphérique humide pour l'altimétrie spatiale : l'approche variationnelle. Diss. Université Paul Sabatier-Toulouse III. (2018).
- [15] Lagerloef, G. S. E., et al. Tropical Pacific near-surface currents estimated from altimeter, wind, and drifter data. Journal of Geophysical Research : Oceans, 104(C10), 23313-23326. (1999).
- [16] Liu, H., et al. Opposite-Sign Sea Surface Salinity Anomalies Over the Northeastern and Southwestern South Atlantic Ocean From 2010 to 2017. Journal of Geophysical Research : Oceans, 127(12), e2022JC019351. (2022).
- [17] Lumpkin, R., and M. Pazos. Measuring surface currents with Surface Velocity Program drifters : The instrument, its data and some recent results. Pp. 39–67. In A. Griffa, A. D. Kirwan, A. J. Mariano, T. Ozgokmen, and T. Rossby [eds.], Lagrangian Analysis and Prediction of Coastal and Ocean Dynamics (LAPCOD). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535901.003> (2007).
- [18] Morrow, R., Fu, L.-L., Ardhuin, F., Benkiran, M., Chapron, B., Cosme, E., d'Ovidio, F., Farrar, J. T., Gille, S. T., Lapeyre, G., Le Traon, P.-Y., Paschal, A., Ponte, A., Qiu, B., Raschle, N., Ubelmann, C., Wang, J., and Zaron, E. D. Global Observations of Fine-Scale Ocean Surface Topography With the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) Mission. Front. Mar. Sci., 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00232> (2019a).
- [19] Morrow, R., Fu, L.-L., Ardhuin, F., Benkiran, M., Chapron, B., Cosme, E., d'Ovidio, F., Farrar, J. T., Gille, S. T., Lapeyre, G., Le Traon, P.-Y., Paschal, A., Ponte, A., Qiu, B., Raschle, N., Ubelmann, C., Wang, J., and Zaron,

- E. D. Global Observations of Fine-Scale Ocean Surface Topography With the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) Mission. *Front. Mar. Sci.*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00232> (2019b).
- [20] Niiler, P. P., N. A. Maximenko, and J. C. McWilliams. Dynamically balanced absolute sea level of the global ocean derived from near-surface velocity observations. *Geophys. Res. Lett.* 30 : 2164–2168. <https://doi.org/10.1029/2003GL018628> (2003).
- [21] Pegliasco, C. Structure verticale des tourbillons de mésoéchelle dans les quatre grands systèmes d’upwelling de bord est [Université Paul Sabatier - Toulouse III]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01427163> (2015).
- [22] Picaut, J., and R. Tournier. Monitoring the 1979–1985 equatorial Pacific current transports with expendable bathythermograph data. *J. Geophys. Res.* 96 (Suppl.) : 3263–3277. (1991).
- [23] Picaut, J., Busalacchi, A. J., McPhaden, M. J., & Camusat, B. Validation of the geostrophic method for estimating zonal currents at the equator from Geosat altimeter data. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 95(C3), 3015-3024. (1990).
- [24] Persson, A. The Coriolis effect—a conflict between common sense and mathematics. Italian Meteorological Society, 20-31. (2005).
- [25] Ralph, E. A., and Pearn P. Niiler. Wind-driven currents in the tropical Pacific. *Journal of Physical Oceanography*, 29(9), 2121-2129. (1999).
- [26] Richardson, P. L. Worldwide ship drift distributions identify missing data. *J. Geophys* (1989).