

Statistiques non gaussiennes des vitesses de surface à partir des données de drifters dans le Golfe de Guinée

[Non-Gaussian statistics of surface velocities from drifter data in the Gulf of Guinea]

Hilaire Amemou¹, Hermann Yapo², Michel Tchiekre³, and Mamadou Koné¹

¹UFR Sciences de La Mer, Université de San Pédro, San Pédro, Côte d'Ivoire

²Classes Préparatoire aux Grandes Ecoles d'Ingénieurs, Université de San Pédro, San Pédro, Côte d'Ivoire

³UFR Sciences biologiques, Département mathématiques physique chimie, Université Peleforo Gon Coulibaly, Korhogo, Côte d'Ivoire

Copyright © 2025 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: We present a thorough Lagrangian analysis of the statistics of surface velocities in the Gulf of Guinea, based on more than twenty years of drifter data. After subtracting the mean Eulerian velocity field and normalizing by the local standard deviation, we compute the probability density functions (PDFs) of the zonal and meridional components of the relative velocities. The distributions obtained display systematic deviations from normality, with heavy tails and moderate asymmetry, suggesting the influence of intermittent energetic events, probably related to mesoscale eddy activity. The analysis of Lagrangian autocovariance functions highlights anisotropy in the integration times, with longer persistence in the zonal direction, in line with the dynamics of equatorial currents. Finally, segmenting trajectories into 10-day segments confirms the robustness of these statistical signatures at the meso scale, supporting the hypothesis of a dynamics dominated by non-Gaussian coherent structures.

KEYWORDS: Drifters, velocity, probability density function, mesoscale eddies, Lagrangian statistics.

RESUME: Nous présentons une analyse lagrangienne approfondie des statistiques des vitesses de surface dans le Golfe de Guinée, basée sur plus de vingt années de données issues de des drifters. Après soustraction du champ de vitesse eulérien moyen et normalisation par l'écart-type local, nous calculons les fonctions de densité de probabilité (PDF) des composantes zonale et méridienne des vitesses relatives. Les distributions ainsi obtenues présentent de manière systématique des déviations marquées par rapport à la normalité, avec des queues épaisses et une asymétrie modérée, suggérant l'influence d'événements énergétiques intermittents, probablement liés à l'activité tourbillonnaire de mésoéchelle. L'analyse des fonctions d'autocovariance lagrangienne met en évidence une anisotropie des temps d'intégration, avec une persistance plus longue dans la direction zonale, en cohérence avec la dynamique des courants équatoriaux. Enfin, le découpage des trajectoires en segments de 10 jours confirme la robustesse de ces signatures statistiques à l'échelle mésoéchelle, consolidant l'hypothèse d'une dynamique dominée par des structures cohérentes non gaussiennes.

MOTS-CLES: Drifter, vitesse, fonction de distribution de probabilité, tourbillons de mésoéchelle, statistiques lagrangiennes.

1 INTRODUCTION

Le transport et la dispersion de particules passives à la surface de l'océan jouent un rôle central en océanographie physique, avec des implications majeures pour la compréhension des circulations à mésoéchelle, la prévision de la dérive de polluants, les opérations de recherche et de sauvetage, ainsi que la gestion des ressources marines côtières [1]. Pour appréhender ces processus dynamiques, les bouées dérivantes (drifters) constituent un outil d'observation privilégié, offrant un accès direct aux trajectoires lagrangiennes à haute résolution spatiale et temporelle.

L'exploitation des données issues de drifters permet d'étudier les propriétés statistiques des mouvements de surface, selon des approches à une particule (statistiques de type single-particle) ou à deux particules (two-particle statistics), selon que l'on s'intéresse à la dispersion absolue ou relative [1], [2]. Ces analyses fournissent des estimations de grandeurs clés telles que les échelles de temps lagrangiennes, la diffusivité turbulente, l'énergie cinétique turbulente ou encore les fonctions d'autocorrélation des vitesses [1], [2], [3].

Parmi les outils statistiques centraux, les fonctions de densité de probabilité (PDF) des composantes zonale et méridienne de la vitesse offrent un moyen synthétique de caractériser les régimes de transport. Lorsque les PDF sont proches de lois normales, cela peut refléter un régime de turbulence homogène et isotrope [4], [5]. Toutefois, de nombreuses études ont révélé des distributions non gaussiennes, souvent marquées par des queues épaisses et une légère asymétrie. Ces signatures sont généralement interprétées comme les marques d'une intermittence dynamique, où les contributions d'événements intenses tels que les tourbillons mésoéchelle ou les jets dominent les statistiques globales [2], [3], [4].

Dans le cadre de la turbulence bidimensionnelle (2D), il a été montré que le mouvement de particules autour de structures cohérentes tourbillonnaires pouvait produire des distributions asymptotiques fortement non gaussiennes. En particulier, des modèles idéalisés à base de tourbillons ponctuels ont permis de démontrer comment la superposition de vitesses induites par plusieurs vortex pouvait générer des PDF à queues épaisses [4]. Ces résultats sont étayés par des simulations numériques à haute résolution ainsi que par l'analyse de longues séries temporelles issues de données historiques [5].

Le Golfe de Guinée constitue une région équatoriale dynamique, dominée par des courants zonaux alternants, une forte variabilité saisonnière, et une activité mésoéchelle non négligeable [6], [7], [8], [9], [10]. Pourtant, cette région reste relativement peu étudiée du point de vue des statistiques lagrangiennes de surface. Quelques travaux isolés ont suggéré que les PDF des vitesses y seraient globalement gaussiennes [11], mais ces études n'ont pas systématiquement tenu compte des effets d'inhomogénéité spatiale ni appliqué de méthode rigoureuse de normalisation du champ de vitesse.

Dans ce contexte, la présente étude vise à combler ce manque en proposant une analyse lagrangienne approfondie des statistiques de vitesse de surface dans le Golfe de Guinée, basée sur plus de deux décennies de données de drifters. Nous estimons les champs moyens de vitesse, l'énergie cinétique, et les fonctions de densité de probabilité (PDF) des vitesses corrigées, après soustraction du champ moyen eulérien et normalisation par bin géographique. L'objectif est de caractériser la forme des distributions et d'en évaluer la robustesse à l'échelle mésoéchelle, à travers un découpage des trajectoires en segments temporels.

2 MATERIELS ET METHODES

2.1 RÉGION D'ÉTUDE

La présente étude se concentre sur le Golfe de Guinée (GG), situé entre les longitudes 12°W et 11,75°E, et les latitudes 4°S et 8°N. Cette région, située à l'est de l'Atlantique tropical, est caractérisée par une dynamique océanique dominée par des courants de surface principalement zonaux. Ceux-ci alternent entre des courants dirigés vers l'ouest tel que le Courant Équatorial Sud (SEC), sous l'influence des alizés du sud-est, et des courants orientés vers l'est, tels que le Courant de Guinée (CG), bien décrits dans les travaux de [12], [13], [14]. Outre cette circulation de surface, plusieurs études ont également mis en évidence l'existence de sous-courants équatoriaux en profondeur, contribuant à la complexité du système de courants équatoriaux du GG [12], [15]. Par ailleurs, un upwelling saisonnier bien marqué s'observe durant l'été boréal dans la partie nord du Golfe de Guinée, notamment le long des côtes ivoiriennes et ghanéennes. Ce phénomène d'upwelling côtier, qui résulte d'une remontée des eaux profondes plus froides et riches en nutriments, joue un rôle écologique crucial en favorisant notamment le recrutement de *Sardinella aurita*, l'un des poissons pélagiques les plus dominants de la région [16], [17], [18]. La dynamique du Golfe de Guinée est également influencée par des structures mésoéchelles telles que les tourbillons, qui peuvent interagir avec l'upwelling côtier et moduler fortement la distribution de température, de nutriments, et la dispersion des particules de surface. [6] ont mis en évidence la présence de tels tourbillons en aval des caps marquant la transition entre la Côte d'Ivoire et le Ghana. Plus récemment, [10] ont confirmé la persistance de ces structures mésoéchelles à proximité de l'upwelling ivoiro-ghanéen, soulignant leur rôle potentiel dans la variabilité interannuelle du transport de matière et d'énergie dans cette zone équatoriale. Cette configuration régionale fait du Golfe de Guinée un cadre idéal pour étudier la variabilité des vitesses de surface à partir d'observations lagrangiennes, ainsi que les signatures statistiques associées à la dynamique turbulente de mésoéchelle.

2.2 BASE DE DONNÉES DES DRIFTERS

Les données utilisées dans cette étude proviennent du Global Drifter Program (GDP), coordonné par la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), qui fournit un ensemble de trajectoires de bouées dérivantes (drifters) de surface sur l'ensemble du globe (Dataset: <https://doi.org/10.25921/7ntx-z961>; [19]). Les drifters du programme sont constitués d'une bouée de surface équipée de capteurs et reliée à une ancre flottante (ou *drogue*) positionnée à 15 mètres de profondeur, permettant un suivi fidèle de la circulation océanique de surface [20]. Ces instruments mesurent plusieurs paramètres océanographiques, notamment la température de surface de la mer (SST), la direction et l'intensité des courants, la pression atmosphérique et parfois le vent en surface. Les données sont transmises en temps quasi réel aux satellites via le système ARGOS, utilisé historiquement, ou le système Iridium, déployé depuis

2015 et aujourd'hui largement majoritaire. Ce dernier, couplé au GPS, permet un échantillonnage plus fréquent et une précision accrue dans les positions enregistrées [21]. Les enregistrements de position sont typiquement effectués toutes les six heures [22], bien que les versions récentes permettent un pas de temps horaire [21]. Pour cette étude, nous avons adopté une approche homogène en fusionnant les deux types de données. Les trajectoires ont été ramenées à une résolution temporelle commune de six heures. Cette étape d'interpolation a permis d'assurer l'homogénéité statistique de l'échantillon tout en conservant un maximum d'informations dynamiques. L'ensemble du jeu de données couvre une période suffisamment longue pour permettre une analyse statistique robuste des vitesses de surface et de leurs propriétés dispersives dans le Golfe de Guinée.

2.3 ANALYSE STATISTIQUES

2.3.1 DISTRIBUTION SPATIALE DES OBSERVATIONS (DRIFTERS)

Afin de caractériser la couverture spatiale de notre jeu de données, nous avons généré des cartes de densité représentant le nombre total d'occurrences des drifters dans chaque cellule d'une grille régulière de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, couvrant le Golfe de Guinée sur la période 1999–2020. Cette approche permet d'évaluer les zones les mieux échantillonnées, ainsi que les biais éventuels liés à la distribution inhomogène des trajectoires. Les cartes de densité fournissent également un cadre spatial pour la moyenne conditionnelle des vitesses et des autres statistiques lagrangiennes.

2.3.2 CHAMP D'ÉNERGIE CINÉTIQUE

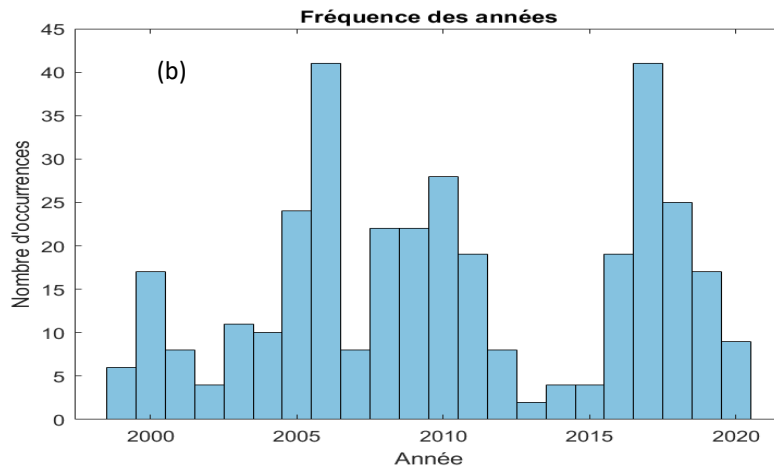
L'énergie cinétique par unité de masse, notée E_{ij} , a été estimée dans chaque cellule de grille selon l'expression:

$$E_{ij} = 1/2 (u_{ij}^2 + v_{ij}^2) \quad (1)$$

où u_{ij} et v_{ij} sont respectivement les composantes zonale et méridienne de la vitesse moyenne dans la cellule de grille (i, j) . Ce champ permet d'identifier les zones dynamiquement actives, notamment en lien avec les courants zonaux, les tourbillons de mésoéchelle ou les régions d'upwelling.

2.3.3 FONCTION DE DENSITE DE PROBABILITE (PDFS)

La distribution statistique des vitesses de surface a été étudiée à travers les fonctions de densité de probabilité (PDFs) des composantes zonale u et méridienne v . Pour une distribution normale centrée réduite, les PDFs théoriques sont données par:



$$P(u) = (1 / \sqrt{2\pi} \sigma_u) \exp(-u^2 / (2\sigma_u^2)) \quad (2)$$

$$P(v) = (1 / \sqrt{2\pi} \sigma_v) \exp(-v^2 / (2\sigma_v^2)) \quad (3)$$

Où σ_u et σ_v représentent les écarts types des composantes de vitesse respectivement zonale et méridienne. Ces PDFs théoriques sont comparées aux distributions empiriques issues des observations afin d'évaluer leur degré de gaussienneté. Une attention particulière est portée à la correction du champ de vitesse par soustraction du champ moyen, conformément à la méthode proposée par [4], pour distinguer l'effet des grandes structures cohérentes de la turbulence.

3 RESULTATS

3.1 CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES TRAJECTOIRES

Les positions initiales de l'ensemble des drifters utilisés dans cette étude ainsi que la répartition temporelle des lâchers par année sont présentées à la Fig. 1. La carte des positions initiales (Fig. 1a) met en évidence une couverture spatiale inégale, concentrée entre 4°S et 0°S dans le Golfe de Guinée. Par ailleurs, les fréquences annuelles des lâchers (Fig. 1b) révèlent une forte variabilité interannuelle, suggérant une disponibilité inégale des données selon les années et potentiellement selon les saisons.

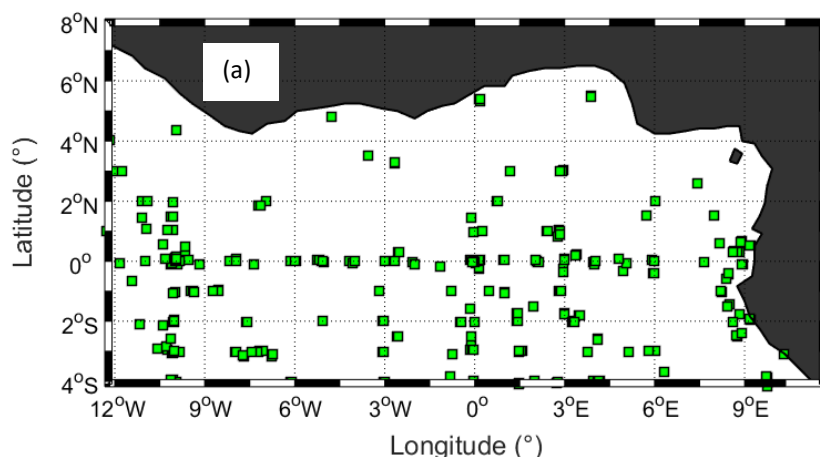


Fig. 1. (a) Positions initiales de tous les drifters utilisés pour l'étude. (b) Fréquences des années de lâchées

3.2 DISTRIBUTION SPATIALE ET CHAMP DE VITESSE EULERIEN

La Fig. 2 présente, d'une part, la densité spatiale des drifters calculée sur une grille régulière de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ (Fig. 2a), et d'autre part, le champ de vitesse eulérien moyen dérivé des vitesses moyennes dans chaque cellule de la grille (Fig. 2b). Pour la carte de densité (Fig. 2a), seules les grilles contenant au moins 30 positions de drifters ont été conservées. Les données sont principalement concentrées entre 1°N et 4°N dans le Golfe de Guinée, avec des densités maximales observées sur les parties est et ouest du bassin. Certaines zones, notamment au nord et au sud-est du domaine, présentent une densité faible. Le champ de vitesse eulérien moyen (Fig. 2b) met en évidence des courants zonaux bien définis, caractérisés par une dominance des composantes vers l'ouest au sud de l'équateur, et vers l'est au nord du Golfe de Guinée.

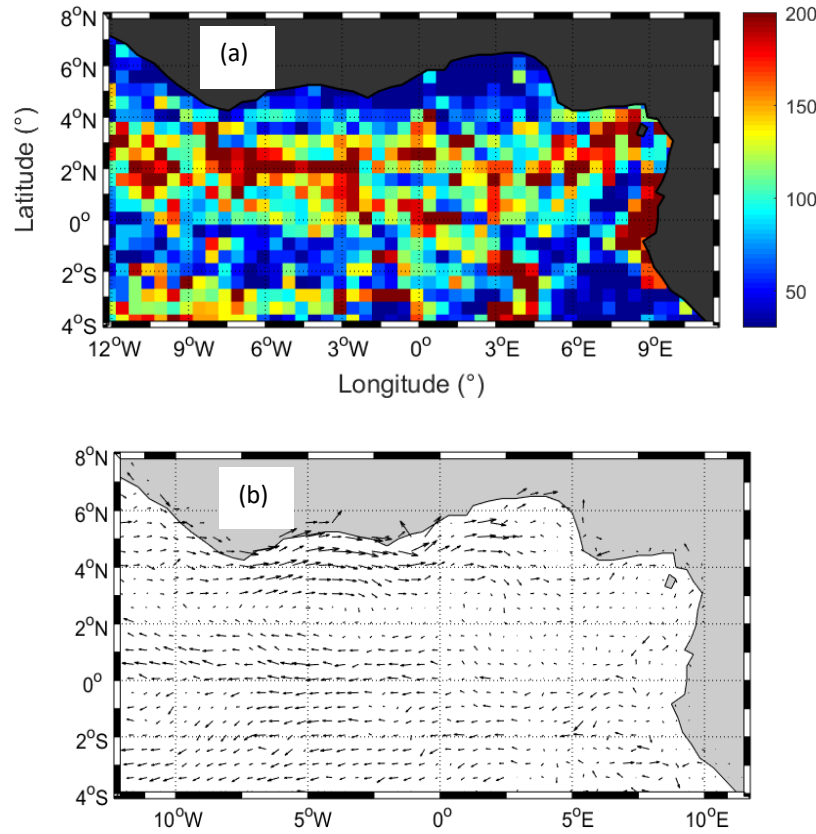


Fig. 2. (a) Densité moyen des drifters calculé dans une grille de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. Les cellules contenant moins de 30 positions sont laissées vides. (b) Champ de vitesse eulérien moyen calculé à partir de la moyenne des positions dans chaque cellule

3.3 ENERGIE CINETIQUE ET VARIANCE DU CHAMP DE VITESSES

La distribution spatiale de deux diagnostics dérivés du champ de vitesse eulérien est présentée: l'énergie cinétique normalisée (Fig. 3a) et la variance normalisée des vitesses (Fig. 3b), calculées sur une grille régulière de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. L'énergie cinétique normalisée met en évidence des zones localisées d'intensité dynamique élevée, notamment dans la partie nord du Golfe de Guinée ainsi que dans la région sud-ouest du bassin. Quant à la variance normalisée, elle révèle les secteurs où les fluctuations de vitesse autour de la moyenne sont les plus marquées. La région comprise entre 0°N et 4°N présente une variance plus élevée que le reste du domaine.

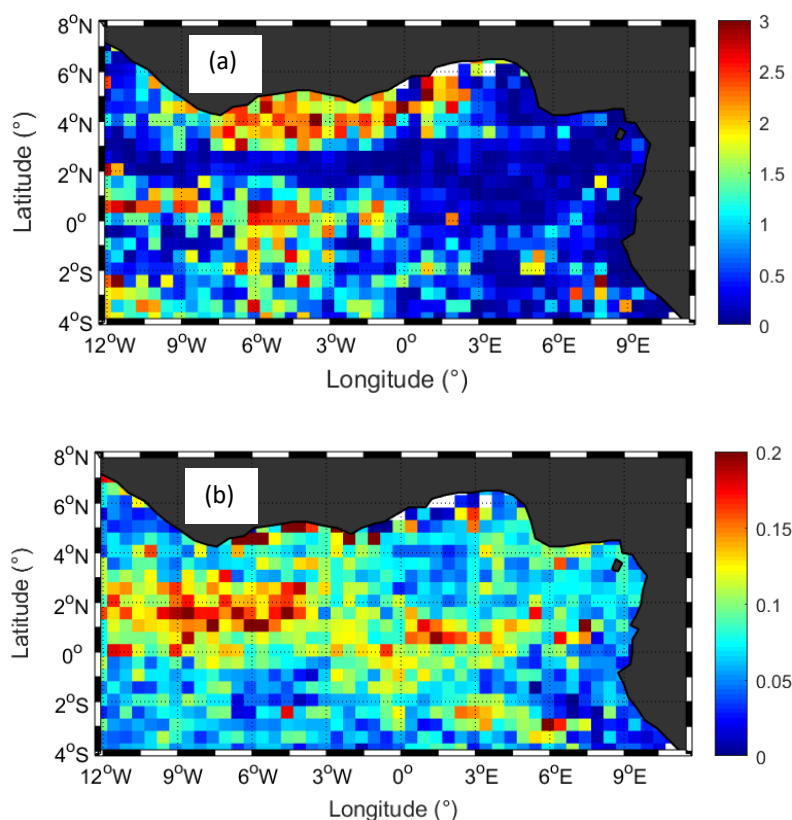


Fig. 3. (a) Densité du champ d'énergie cinétique normalisé par la vitesse moyenne des drifters. (b) Densité de la variance normalisée du champ de vitesse

3.4 DISTRIBUTIONS DE VITESSES (PDFs)

Les fonctions de densité de probabilité (PDFs) des vitesses zonale et méridienne sont présentées pour les données brutes (Figs. 4a et 4b) ainsi que pour les vitesses corrigées u' et v' (Figs. 4c et 4d). Dans chaque cas, une distribution gaussienne théorique, ayant la même moyenne et écart-type que les données, est superposée sous forme de courbe pointillée pour référence. Les distributions observées, qu'elles soient brutes ou corrigées, s'écartent clairement de la loi normale, affichant des queues épaisses caractéristiques. Cette non-gaussianité est corroborée par les moments statistiques: skewness de $-0,08$ pour u' et $0,14$ pour v' , ainsi qu'une kurtosis élevée, respectivement de $3,63$ et $3,79$. Ces valeurs traduisent une légère asymétrie et une présence significative de queues épaisses. Par ailleurs, le test de Kolmogorov-Smirnov appliqué aux séries corrigées confirme le rejet de l'hypothèse de normalité avec un niveau de confiance élevé: pour la composante zonale u' , $n = 3235$, $p = 3.39 \times 10^{-12}$ et pour la composante méridienne (v'): $n = 12421$, $p = 6.93 \times 10^{-21}$.

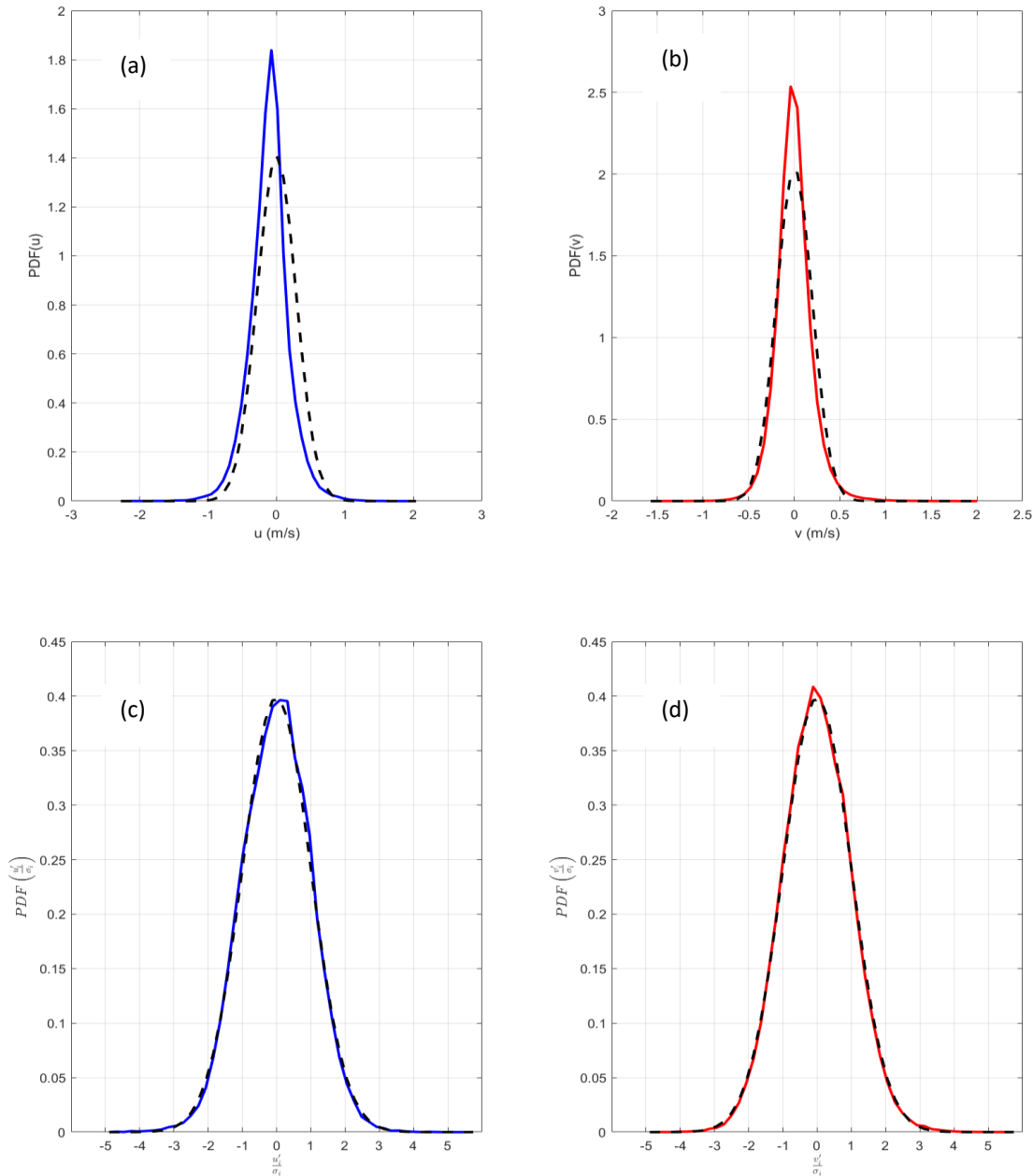


Fig. 4. Fonctions de densité de probabilité (PDFs) des vitesses pour (a) la composante zonale (en bleu, à gauche) et (b) la composante méridienne (en rouge, à droite). Les PDFs des vitesses corrigées sont représentées pour (c) la vitesse zonale et (d) la vitesse méridienne. Les lignes en pointillées représentent la distribution normale dans chaque cas

3.5 FONCTIONS D'AUTOCORRÉLATION LAGRANGIENNES

Fig. 5 présente la fonction d'autocovariance lagrangienne des vitesses zonale (Fig. 5a) et méridienne (Fig. 5b), calculée à partir de l'ensemble des trajectoires complètes de drifters. La décroissance de l'autocovariance avec le temps de décalage (τ) reflète la perte progressive de corrélation des vitesses dans le temps. La composante zonale montre une autocorrélation plus persistante que la composante méridienne, suggérant une dynamique plus cohérente dans la direction zonale. Les temps d'intégration lagrangiens ont été calculés comme l'intégrale de l'autocovariance normalisée: $T_{Lz} = 6,64$ jours et $T_{Lv} = 1,70$ jours. Ces valeurs ont ensuite servi de base pour définir la taille des segments utilisés dans les calculs statistiques ultérieurs. Ainsi, les trajectoires ont été découpées en segments de 10 jours, durée cohérente avec les échelles temporelles caractéristiques du mouvement des particules dans la région.

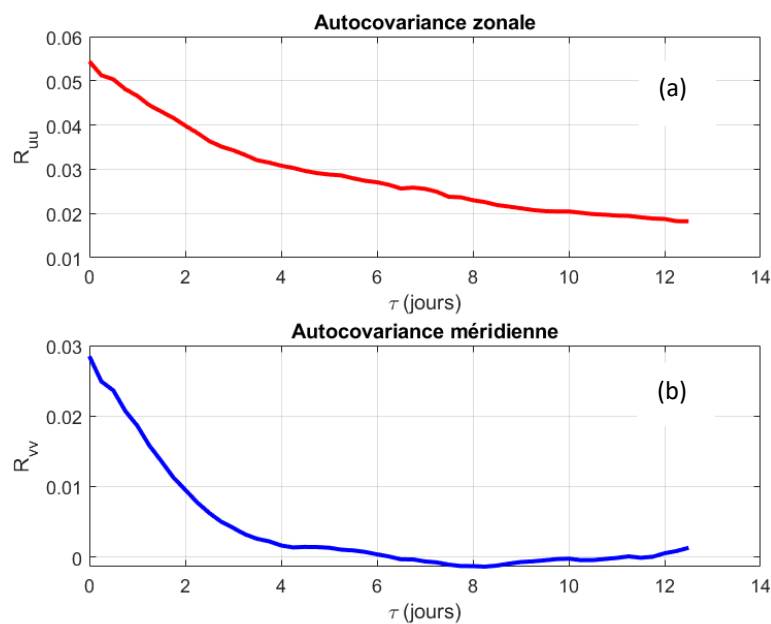


Fig. 5. Autocovariance de la vitesse lagrangienne pour (a) la composante zonale (en rouge) et (b) la composante méridienne (en bleu)

3.6 ANALYSE À L'ÉCHELLE DE 10 JOURS

Les fonctions de densité de probabilité (PDF) des vitesses zonale et méridienne sont ici calculées à partir de segments de trajectoires découpés en intervalles de 10 jours, conformément aux échelles temporelles caractéristiques estimées précédemment. Les graphiques en haut présentent les PDFs des vitesses non corrigées, tandis que ceux du bas correspondent aux vitesses corrigées par soustraction du champ de vitesse eulérien moyen. Dans tous les cas, les distributions s'écartent nettement de la loi normale (courbe pointillée), avec des queues épaisses et une forme aplatie. Cette persistance de la non-gaussianité, même après correction, corrobore les résultats obtenus sur l'ensemble des séries complètes (voir Fig. 4).

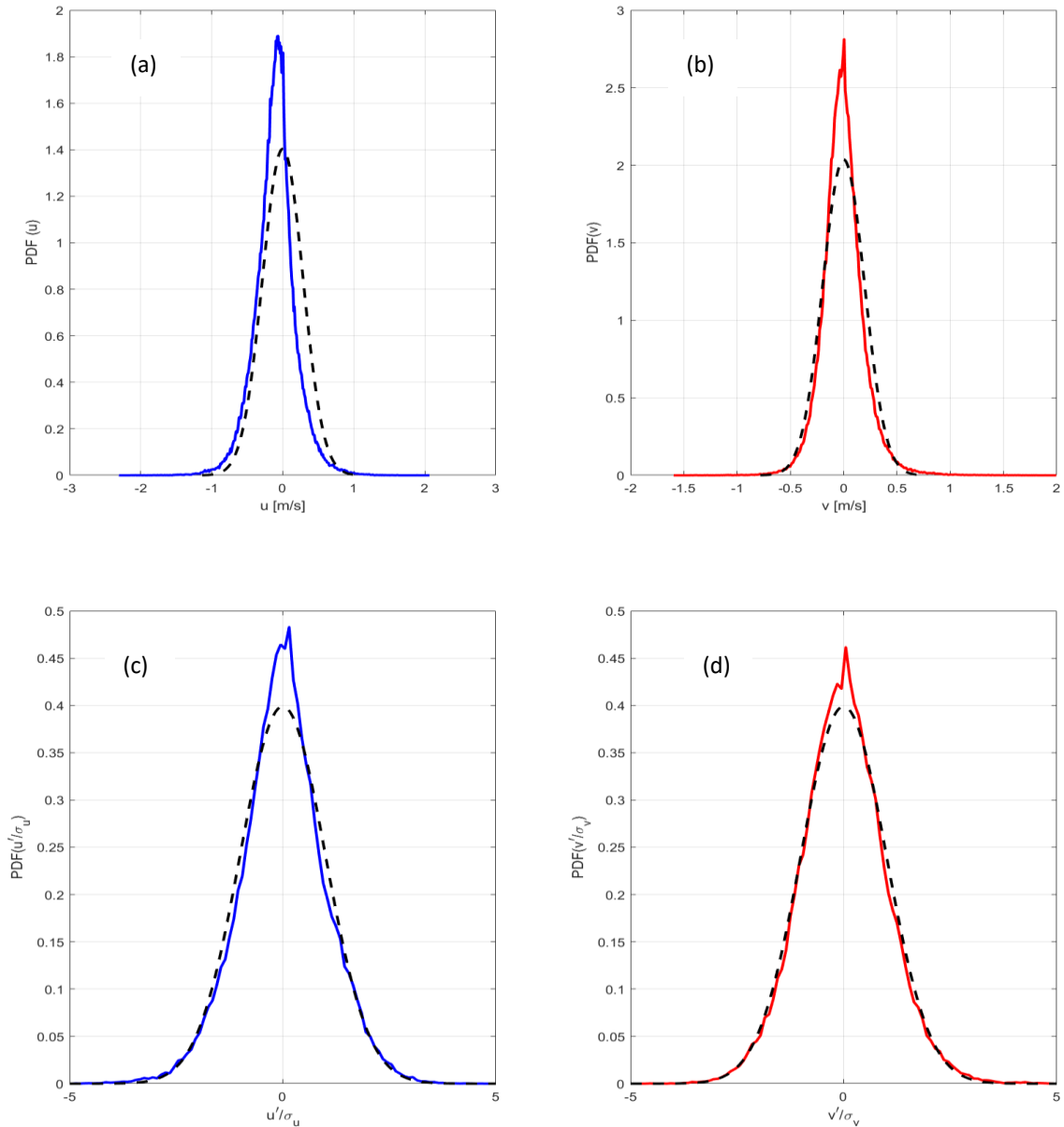


Fig. 6. Fonctions de densité de probabilité (PDFs) des vitesses zonales (a) brute et (c) corrigée ainsi que des vitesses méridiennes (b) brute et (d) corrigée. Ces vitesses ont été calculées à partir de segments de trajectoires de 10 jours. Les lignes pointillées représentent la distribution normale correspondante dans chaque cas

4 DISCUSSIONS

La distribution des positions initiales des drifters (Fig. 1) met en évidence une couverture spatiale inhomogène dans le Golfe de Guinée. Une concentration marquée des lâchers est observée dans la zone équatoriale centrale, en particulier entre 4°S et 0°, où se situe la majorité des déploiements. À l'inverse, les régions ouest et nord présentent un faible déploiement densité nettement plus faible, traduisant un sous-échantillonnage structurel de certaines zones. Cette inégale répartition est également amplifiée par une forte variabilité interannuelle du nombre de drifters actifs, ce qui engendre une couverture temporelle hétérogène. Ces biais spatiaux et temporels peuvent potentiellement affecter la représentativité régionale et saisonnière des statistiques lagrangiennes. Néanmoins, notre étude se concentre sur les caractéristiques de la dispersion à partir des données effectivement disponibles, en gardant à l'esprit que certaines régions sont mieux échantillonnées que d'autres. L'interprétation des résultats tient compte de ces limites.

La densité spatiale des drifters, calculée dans chaque cellule de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ (Fig. 2a), confirme cette hétérogénéité, avec des zones de forte densité localisées principalement entre 1°N et 4°N. En revanche, les zones périphériques au nord et au sud-est du domaine montrent une très faible densité, parfois inférieure à un drifter par cellule. Cette distribution reflète à la fois les stratégies de déploiement et la dynamique des courants de surface qui conditionnent les trajectoires. Le champ de vitesse eulérien moyen calculé sur l'ensemble

de la période (Fig. 2b) révèle des structures cohérentes avec les circulations zonales typiques du Golfe de Guinée. On distingue clairement une circulation orientée d'ouest en est au nord du domaine, correspondant au courant de Guinée, tandis qu'une circulation vers l'ouest domine entre 4°S et 2°N, associé au courant équatorial sud (SEC). Ces régimes sont cohérents avec les observations rapportées par [12], [13], [14], confirmant la capacité des drifters à capturer les structures de courant de grande échelle.

L'énergie cinétique et la variance du champ de vitesses, présentées à la Fig 3 révèlent une dynamique de surface fortement hétérogène dans le Golfe de Guinée. L'énergie cinétique normalisée (Fig 3a) met en évidence des zones d'intensité dynamique marquée, notamment dans la région nord du bassin, entre 1°N et 4°N, ainsi que dans la partie sud-ouest. Ces concentrations d'énergie traduisent des régions d'activité dynamique accrue, possiblement liées à des jets côtiers, des courants de bord ou à la présence de structures mésoéchelles actives. La variance normalisée des vitesses (Fig. 3b) complète cette lecture en révélant une forte variabilité des vitesses autour de la moyenne, principalement dans la bande équatoriale comprise entre 0°N et 4°N. Ces niveaux élevés de variance sont typiques de zones d'instabilité dynamique, propices à l'émergence de tourbillons mésoéchelles intermittents ou d'autres phénomènes transitoires. En particulier, la région nord du Golfe de Guinée, à proximité de la zone d'upwelling ivoiro-ghanéen, présente simultanément des valeurs élevées d'énergie cinétique et de variance, suggérant un régime fortement perturbé. Cette signature est cohérente avec la présence de tourbillons cycloniques récurrents, déjà documentés dans cette zone [6], [10], et associés à une dynamique locale persistante. Ces diagnostics mettent en évidence la coexistence de régimes dynamiques contrastés, depuis des courants relativement cohérents à forte énergie moyenne, jusqu'à des zones plus désorganisées où domine la variabilité. Cette structuration hétérogène du champ de courant a des implications majeures sur la dispersion lagrangienne et la forme statistique des PDFs de vitesses.

Les fonctions de densité de probabilité (PDFs) des vitesses zonale (u) et méridienne (v), illustrées à la Fig. 4, révèlent des écarts significatifs par rapport à une distribution gaussienne, tant pour les vitesses brutes que pour les vitesses corrigées (u' , v'). Les tests de Kolmogorov–Smirnov confirment statistiquement ces écarts (valeurs de $p \ll 0.05$), et les moments d'ordre supérieur montrent des kurtosis nettement supérieures à 3 pour les composantes corrigées (3.63 pour u' , 3.79 pour v'), traduisant la présence de queues épaisses. Malgré la correction par retrait du champ de vitesse eulérien moyen, les distributions conservent une forme non gaussienne et légèrement asymétrique (skewness ≈ 0), suggérant que la non-gaussianité ne résulte pas uniquement de l'advection organisée par le courant moyen. Elle reflète plutôt une variabilité intrinsèque du champ turbulent, caractérisée par des événements intermittents à forte intensité. Ce comportement a déjà été mis en évidence dans d'autres bassins océaniques. En Méditerranée [4] et dans le Golfe du Mexique [23], des analyses similaires ont montré que les PDFs deviennent gaussiennes uniquement lorsqu'on filtre les vitesses extrêmes, souvent associées à des tourbillons ou à des circulations intenses localisées. Dans le cas du Golfe de Guinée, plusieurs études ont documenté la présence récurrente de tourbillons mésoéchelles, notamment en aval des caps ivoiriens [6], [7], [8], [9], [10], qui peuvent piéger les drifters et générer des vitesses anormalement fortes ou faibles, contribuant ainsi à l'extension des PDFs.

La fonction d'autocovariance lagrangienne des vitesses, illustrée à la Fig. 5, permet d'évaluer la persistance temporelle des mouvements des drifters. Les résultats ont montré une décroissance progressive de la corrélation des vitesses avec le temps de décalage (τ), signe caractéristique d'un processus stochastique et turbulent. Cette décroissance est plus lente pour la composante zonale, indiquant une plus grande cohérence temporelle des mouvements est-ouest, typiques des régimes équatoriaux dominés par des courants zonaux persistants. Les temps d'intégration lagrangiens, obtenus par intégration des fonctions d'autocovariance normalisées, sont de 6,64 jours pour la composante zonale et de 1,70 jours pour la composante méridienne. Ces valeurs confirment l'anisotropie marquée du champ de vitesse, avec un transport préférentiel dans la direction zonale, cohérent avec la présence du Courant de Guinée et du SEC ([12], [13], [14]). Ces résultats s'inscrivent dans les ordres de grandeur attendus pour des structures de mésoéchelle en région équatoriale, où les instabilités méridiennes sont souvent plus courtes et plus dispersives. Des études antérieures ont rapporté des valeurs similaires du temps Lagrangien T_L dans d'autres bassins tropicaux, notamment en Atlantique Nord et dans le Pacifique équatorial [1], bien que la géométrie et les caractéristiques de forçage diffèrent. Enfin, ces temps d'intégration ont guidé le choix de la durée des segments statistiques utilisés dans les analyses ultérieures (10 jours), correspondant à une échelle temporelle suffisamment longue pour capturer la dynamique mésoéchelle.

L'analyse des vitesses issues de segments de 10 jours, conforme aux échelles caractéristiques estimées précédemment, permet d'examiner la structure statistique du transport lagrangien à une échelle intermédiaire, représentative des processus de mésoéchelle. Les PDFs des vitesses zonale et méridienne (Fig. 6) révèlent que, même après correction par soustraction du champ de vitesse eulérien moyen, les distributions conservent une forme non gaussienne: les queues épaisses et le profil aplati persistent dans toutes les composantes.

Ce résultat suggère que la non-gaussianité du champ de vitesse est une propriété robuste, présente non seulement à l'échelle des trajectoires complètes (Fig. 4), mais également à l'échelle statistiquement pertinente de 10 jours. L'intermittence des événements dynamiques, telle que générée par des structures mésoéchelles cohérentes ou des fluctuations énergétiques transitoires, affecte la distribution des vitesses indépendamment de l'advection moyenne. Cette persistance est cohérente avec des études similaires menées dans d'autres régions océaniques, notamment dans le Golfe du Mexique [2], [23] et la Méditerranée [4], où les distributions de vitesses corrigées restent également non gaussienne. Cependant, plusieurs limites méthodologiques doivent être considérées. Le découpage des trajectoires en cellule implique un lissage spatial qui peut atténuer certaines signatures dynamiques locales. De plus, la résolution temporelle des données (6 heures) peut filtrer certaines fluctuations à haute fréquence, réduisant potentiellement la kurtosis apparente.

Enfin, les hypothèses d'indépendance et de stationnarité sous-jacentes aux tests statistiques doivent être nuancées, particulièrement dans un contexte où la variabilité saisonnière du système côtier influence fortement la dynamique observée.

5 CONCLUSION

Cette étude fournit une caractérisation lagrangienne détaillée de la dynamique de surface dans le Golfe de Guinée, à partir de trajectoires de drifters du programme GDP. L'analyse statistique des vitesses, de leur autocorrélation, et des PDFs met en évidence une circulation complexe marquée par une forte hétérogénéité spatiale et des signatures non gaussiennes robustes. Les vitesses mesurées montrent une circulation moyenne dominée par des courants zonaux vers, conforme à la dynamique régionale. Toutefois, les analyses des PDFs des vitesses, brutes comme corrigées, révèlent des distributions à queues épaisses et une déviation significative de la loi normale, comme le confirment les moments statistiques (kurtosis > 3) et les tests de Kolmogorov–Smirnov. Ce comportement suggère une forte influence de structures intermittentes et mésoéchelles, susceptibles d'introduire des événements énergétiques dans la dispersion lagrangienne. Les fonctions d'autocovariance ont permis d'estimer des temps d'intégration lagrangiens anisotropes ($T_{Lz}=6,65$ jours et $T_{Lv}=1,70$ jours), traduisant une dynamique plus cohérente dans la direction zonale. Sur cette base, un découpage des trajectoires en segments de 10 jours a été effectué, confirmant que la non-gaussianité persistait à cette échelle, même après correction eulérienne. Ces résultats indiquent que la dispersion des particules à la surface du Golfe de Guinée ne peut être décrite par des modèles de diffusion classiques fondés sur des hypothèses de turbulence homogène et gaussienne. La complexité des régimes observés souligne la nécessité d'approches lagrangiennes fines pour caractériser la variabilité dynamique de cette région, en particulier dans le contexte de la modélisation du transport de polluants ou de larves marines.

DÉCLARATION DE FINANCEMENT

Aucune source de financement n'a été sollicitée ni obtenue pour ce travail de recherche.

DÉCLARATION DE CONFLITS D'INTÉRÊTS

L'auteur correspondant déclare, au nom de tous les co-auteurs, qu'il n'existe aucun conflit d'intérêts pertinent au regard du contenu de cette publication.

REFERENCES

- [1] « Lagrangian Statistics from Oceanic and Atmospheric Observations », in *Lecture Notes in Physics*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, p. 165-218. doi: 10.1007/978-3-540-75215-8_8.
- [2] L. Zavala Sansón, J. Sheinbaum, et P. Pérez-Brunius, « Single-particle statistics in the southern Gulf of Mexico », *Geofísica Int.*, vol. 57, n° 2, p. 139-150, 2018.
- [3] A. Bracco, J. LaCasce, C. Pasquero, et A. Provenzale, « The velocity distribution of barotropic turbulence », *Phys. Fluids*, vol. 12, n° 10, p. 2478-2488, 2000.
- [4] A. Bracco, J. H. LaCasce, et A. Provenzale, « Velocity probability density functions for oceanic floats », *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 30, n° 3, p. 461-474, 2000.
- [5] C. Pasquero, A. Provenzale, et A. Babiano, « Parameterization of dispersion in two-dimensional turbulence », *J. Fluid Mech.*, vol. 439, p. 279-303, 2001.
- [6] S. Djakouré, P. Penven, B. Boulès, J. Veitch, et V. Koné, « Coastally trapped eddies in the north of the Gulf of Guinea », *J. Geophys. Res. Oceans*, vol. 119, n° 10, p. 6805-6819, oct. 2014, doi: 10.1002/2014JC010243.
- [7] K. Nieto et F. Mélin, « Variability of chlorophyll-a concentration in the Gulf of Guinea and its relation to physical oceanographic variables », *Prog. Oceanogr.*, vol. 151, p. 97-115, 2017.
- [8] H. M. A. Aguedjou, I. Dadou, A. Chaigneau, Y. Morel, et G. Alory, « Eddies in the Tropical Atlantic Ocean and Their Seasonal Variability », *Geophys. Res. Lett.*, vol. 46, n° 21, p. 12156-12164, nov. 2019, doi: 10.1029/2019GL083925.
- [9] H. Amemou, V. Koné, A. Aman, et C. Lett, « Assessment of a Lagrangian model using trajectories of oceanographic drifters and fishing devices in the Tropical Atlantic Ocean », *Prog. Oceanogr.*, vol. 188, p. 102426, oct. 2020, doi: 10.1016/j.pocean.2020.102426.
- [10] A. K. Thiam *et al.*, « Mesoscale dynamics and its interaction with coastal upwelling in the northern Gulf of Guinea », *Front. Mar. Sci.*, vol. 11, p. 1500753, 2024.
- [11] M. S. Swenson et P. P. Niiler, « Statistical analysis of the surface circulation of the California Current », *J. Geophys. Res. Oceans*, vol. 101, n° C10, p. 22631-22645, oct. 1996, doi: 10.1029/96jc02008.
- [12] B. Bourles, R. L. Molinari, E. Johns, W. D. Wilson, et K. D. Leaman, « Upper layer currents in the western tropical North Atlantic (1989–1991) », *J. Geophys. Res. Oceans*, vol. 104, n° C1, p. 1361-1375, janv. 1999, doi: 10.1029/1998jc900025.
- [13] R. Lumpkin et S. L. Garzoli, « Near-surface circulation in the Tropical Atlantic Ocean », *Deep Sea Res. Part Oceanogr. Res. Pap.*, vol. 52, n° 3, p. 495-518, mars 2005, doi: 10.1016/j.dsr.2004.09.001.

- [14] K. Bosson, A. Aman, E. Toualy, et S. Arnault, « The surface Guinea Current variability from satellite data », *Reg. Stud. Mar. Sci.*, vol. 64, p. 103045, 2023.
- [15] G. Herbert, B. Bourlès, P. Penven, et J. Grelet, « New insights on the upper layer circulation north of the Gulf of Guinea », *J. Geophys. Res. Oceans*, vol. 121, n° 9, p. 6793-6815, sept. 2016, doi: 10.1002/2016jc011959.
- [16] V. Koné, C. Lett, P. Penven, B. Bourlès, et S. Djakouré, « A biophysical model of *Sardinella aurita* early life history in the northern Gulf of Guinea », *Prog Ocean.*, vol. 151, 2016, Consulté le: 11 juillet 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/profile/Bernard-Bourles/publication/322951148_International_conference_ICAWA_2016_extended_book_of_abstract_the_AWA_project_ecosystem_approach_to_the_management_of_fisheries_and_the_marine_environment_in_West_African_waters/links/5c4580c6fdccd6b5bcc067/International-conference-ICAWA-2016-extended-book-of-abstract-the-AWA-project-ecosystem-approach-to-the-management-of-fisheries-and-the-marine-environment-in-West-African-waters.pdf
- [17] Y. Y. H. Amemou, « Modélisation biophysique de la dispersion et de la croissance des larves de sardinelles dans le Golfe de Guinée », PhD Thesis, Sorbonne Université; Université Félix Houphouët-Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 2021. Consulté le: 11 juillet 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-03681804/>.
- [18] H. Amemou, K. Bosson, et M. Koné, « Impact of Diel Vertical Migration (DVM) on *Sardinella aurita* retention in the northern Gulf of Guinea », *Res. Mar. Sci.*, vol. 10, p. 667-684, 2025.
- [19] L. C. Laurindo, A. J. Mariano, et R. Lumpkin, « An improved near-surface velocity climatology for the global ocean from drifter observations », *Deep Sea Res. Part Oceanogr. Res. Pap.*, vol. 124, p. 73-92, juin 2017, doi: 10.1016/j.dsr.2017.04.009.
- [20] R. Lumpkin et M. Pazos, « Measuring surface currents with Surface Velocity Program drifters: the instrument, its data, and some recent results », *Lagrangian Anal. Predict. Coast. Ocean Dyn.*, vol. 39, p. 67, 2007.
- [21] S. Elipot, R. Lumpkin, R. C. Perez, J. M. Lilly, J. J. Early, et A. M. Sykulski, « A global surface drifter data set at hourly resolution », *J. Geophys. Res. Oceans*, vol. 121, n° 5, p. 2937-2966, mai 2016, doi: 10.1002/2016jc011716.
- [22] D. V. Hansen et P.-M. Poulain, « Quality control and interpolations of WOCE-TOGA drifter data », *J. Atmospheric Ocean. Technol.*, vol. 13, n° 4, p. 900-909, 1996.
- [23] L. Z. Sansón, P. Pérez-Brunius, et J. Sheinbaum, « Surface relative dispersion in the southwestern Gulf of Mexico », *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 47, n° 2, p. 387-403, 2017.