

# UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



## ÉCOLE SUPÉRIEURE POLYTECHNIQUE

---

Mémoire de MASTER 2 RECHERCHE «SCIENCE DE L'INGÉNIEUR»

Option : Météorologie, Océanographie et Gestion des Milieux Arides  
(MOGMA)

Année Universitaire : 2022-2023

---

**THÈME : Influence de l'Océan sur l'Atmosphère à proximité des côtes sénégalaises,  
aux échelles intra-saisonnières**

Présenté par :

**Cheikh Abdoul Khadre KANTE**

---

**Encadrant** : Dr. Moussa DIAKHATÉ (UAM)

**Superviseur** : Professeur Amadou Thierno GAYE

Sotenu publiquement le **08 Mars 2025** devant le **jury** composé de :

Professeur Seydou Moustapha SALL	Président	LPAO-SF
Docteur Ibrahima CAMARA	Examinateur	LPAO-SF
Docteur Abdou Lahat DIENG	Rapporteur	LPAO-SF

---

# Dédicace

À ma mère, Adama KOITÉ pour votre amour inconditionnel, vos innombrables prières et vos sacrifices qui m'ont permis d'avancer. Maman, vous êtes la lumière de ma vie et la source de ma motivation. Qu'Allah, le Tout-Puissant, vous préserve et vous accorde santé, longue vie et bonheur.

À mon père, Ossouby pour votre sagesse et votre dévouement. Vos encouragements et votre foi en moi ont toujours été une force motrice dans mon parcours.

À toutes la famille KANTE, notamment,  
À mes grandes sœurs, Madina et Kadiatou, pour leur affection, leur présence rassurante, et leurs précieux conseils qui m'ont guidé tout au long de ma vie.  
À mes grands frères, Babacar et Mamadou, pour leur soutien indéfectible et leur rôle de modèles, toujours prêts à m'encourager et à me soutenir dans les moments difficiles.

À mon petit frère, Fallou ("Sama Sérgine"), pour sa joie communicative et son admiration sincère.

À mes amis, Mady Niakhasso, Hamady Kanté, Inssa Ndiaye, Abdourakhmane Niang, Bangaly Traoré, Amath Diouf, Ibrahima Sori Diallo, Mouhamadou Massouba, Ibou Baldé, Mamadou Souaré, Madické Diallo, Daouda Sow, Aliou Baldé.

À toute la famille DIAKHATÉ depuis la SICAP, Aziz, Souadou, Aida, Ndéye Awa, Néné.

À toute ma famille, à mes proches et à ceux qui m'ont encouragé de près ou de loin, cette réussite est aussi la vôtre.

Avec tout mon amour et ma gratitude.

# Remerciements

Je tiens avant tout à rendre grâce à Dieu, source infinie de force et de volonté, qui m'a accompagné avec bienveillance tout au long de ces années d'études. C'est grâce à Sa guidance que ce travail a pu voir le jour.

Je remercie sincèrement le **Professeur Saïdou Moustapha SALL**, Directeur du Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de l'Océan Siméon Fongang (LPAO-SF), pour m'avoir chaleureusement accueilli au sein de son laboratoire. Je remercie du fond du cœur le **Professeur Amadou Thierno Gaye**.

Je remercie du fond du cœur mes encadrants, **Dr. Moussa DIAKHATÉ**, **Dr. Dahirou WANE**, **Dr. Badara SANÉ**, **Dr. Alban LAZAR** et **Pr. Amadou Thierno Gaye**. Leur encadrement précieux, leur bienveillance et leur expertise m'ont permis de mener à bien cette étude, en m'apportant des orientations claires et pertinentes à chaque étape de ce projet. À eux, je dédie mes plus sincères remerciements pour la confiance qu'ils m'ont accordée et pour les nombreux enseignements partagés.

Je tiens également à remercier les membres de mon jury, **Dr. Moussa Diakhaté** (encadrant), **Dr. Ibrahima Camara** (examinateur), **Dr. Abdou Lahat Dieng** (rapporteur) et **Pr. Seydou Moustapha Sall** (président), pour leur disponibilité et l'évaluation de ce travail.

Je remercie également tous les doctorants et post-doctorants du LPAO-SF, notamment **Badara Sané**, **Dahirou Wane**, **Ibrahima Camara**, **Sémou Diouf**, **Dame Ndao**, **Waly Dione**, **Cheikh Noreyni Fall**, **Sidiki Ba**, **Demba Ndao**, **Abdoukhadre Diouf**, **Dioumacore Faye**, **Mamadou Thiam**, **Mame Diarra Diouf**, **Aissatou Seck**, **Amanatou B. Guèye**, **Katherine Mané**, pour leur soutien et leurs échanges enrichissants.

Je tiens à adresser un merci tout particulier à mes camarades de promotion, dont l'amitié et les encouragements ont été une véritable source de motivation : **Barham Guéye**, **Diéne Faye**, **Latyr Diouf**, **Malamine Coly**, **Jean Didier Gatimounga**, **Balla Fall**, avec qui j'ai partagé de nombreux moments d'études et de convivialité.

# Résumé

Cette étude vise à approfondir notre compréhension des interactions entre l'océan et l'atmosphère, avec un focus particulier sur les rétroactions de l'océan sur l'atmosphère dans la région côtière de Melax. En analysant des séries temporelles de la température de surface de la mer (SST) et des vents, filtrées à l'échelle intra-saisonnière, nous avons mis en évidence des processus complexes et diversifiés qui dépassent le cadre des hypothèses classiques de rétroaction.

Contrairement au mécanisme théorique proposé par Sweet et al. (1981), selon lequel une SST positive accélère localement les vents tandis qu'une SST négative les ralentit, nos résultats montrent que cette relation n'est pas systématique dans la zone d'étude. Si certains décalages temporels (lags) révèlent des changements de direction du vent, leur intensité n'est pas toujours corrélée aux variations de la SST, indiquant l'influence de phénomènes locaux indépendants de la rétroaction océan-atmosphère.

Toutefois, certaines rétroactions conformes au mécanisme classique ont été notées, mettant en évidence des cas où des anomalies de SST ont influencé les vents de manière prévisible. Ces occurrences, bien que rares, montrent que des conditions spécifiques peuvent parfois favoriser des interactions plus directes entre la SST et la dynamique des vents. Ces résultats révèlent la complexité des mécanismes sous-jacents et l'importance des processus locaux dans la modélisation des interactions océan-atmosphère.

Cette étude ouvre des perspectives importantes pour l'analyse des interactions océaniques et atmosphériques dans les zones côtières. Elle souligne également la nécessité d'intégrer davantage de données in-situ et de modèles numériques à haute résolution pour affiner notre compréhension des rétroactions entre la SST et les vents, notamment aux échelles temporelles fines.

**Mots-clés :** rétroaction océan-atmosphère, SST, vents côtiers, variabilité intrasaisonnière, zone côtière de Melax

# Abstract

This study aims to enhance our understanding of ocean-atmosphere interactions, focusing specifically on ocean feedback to the atmosphere in the coastal region of Melax. By analyzing time series of sea surface temperature (SST) and winds filtered at the intraseasonal scale, we identified complex and diverse processes that challenge classical feedback assumptions.

Unlike the theoretical framework proposed by Sweet et al. (1981), which suggests that positive SST anomalies locally accelerate winds while negative SSTA slow them down, our findings indicate that this relationship is not systematic in the study area. While some time lags reveal wind direction changes, their intensity is often decoupled from SST variations, suggesting the influence of local phenomena independent of SST feedback.

However, certain feedbacks consistent with the classical mechanism were observed, highlighting instances where SST anomalies influenced wind patterns predictably. Although infrequent, these occurrences demonstrate that specific conditions can sometimes promote direct interactions between SST and wind dynamics. These findings underscore the complexity of underlying mechanisms and the significant role of local processes in modeling ocean-atmosphere interactions.

This study paves the way for further exploration of ocean-atmosphere interactions in coastal areas. It also emphasizes the need to incorporate additional in-situ data and high-resolution numerical models to refine our understanding of SST-wind feedbacks, especially at finer temporal scales.

**Keywords:** ocean-atmosphere feedback, SST, coastal winds, intraseasonal variability, Melax coastal region

# Liste des acronymes

- CLAM** — Couche Limite Atmosphérique Marine
- CTD** — Conductivity, Temperature, Depth
- DJF** — Décembre-Janvier-Février
- DWS** — Dakar Weather Station
- E +** — Événement de Pic positif
- E -** — Événement de Pic négatif
- ECMWF** — European Center for Medium-Range Weather Forecasts ou CEPMMT
- ERA** — ECMWF ReAnalysis ou Réanalyses du CEPMMT
- IPSL** — Institut Pierre-Simon Laplace
- JJA** — Juin-Juillet-Août
- KNN** — K-Nearest Neighbors
- LOCEAN** — Laboratoire d’Océanographie et du Climat : Expérimentation et Approches Numériques
- LPAO-SF** — Laboratoire de Physique de L’atmosphère Siméon Fongang
- MAM** — Mars-Avril-Mai
- METAR** — METeorological Airport Repor
- NE** — Nord-Est
- NOAA** — National Oceanic and Atmospheric Administration
- NW** — Nord-Ouest
- SON** — Septembre-Octobre-Novembre

---

**SST** — Sea Surface Temperature ou Température de surface de la mer

**SSTA** — Sea Surface Temperature Anomaly

**SU** — Sorbonne Université

**UAM** — Université Amadou Mahtar MBOW

**WSPD** — Wind Speed ou Vitesse du Vent

**ZCIT** — Zone de Convergence Inter-tropicale

---

# Tables des matières

Dédicace	i
Remerciments	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Liste des acronymes	v
Tables des matières	vii
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xi
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b>	<b>1</b>
<b>1 Caractéristiques océaniques et climatiques de notre zone d'étude</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction . . . . .	3
1.2 Importance des zones côtières sur les études de couplage Océan-atmosphère	4
1.3 Contexte Climatique et Océanique de la région sénégalaise . . . . .	6
1.4 Interactions Océan-Atmosphère . . . . .	8
1.4.1 Complexité des interactions Océan-Atmosphère . . . . .	8
1.4.2 Les mécanismes d'interactions Océan-atmosphère . . . . .	10
1.4.2.1 Mécanisme d'ajustement vertical de Sweet . . . . .	11
1.4.2.2 Mécanisme d'advection horizontale de Lindzen et Nigam .	12
1.5 Effets des Upwellings et des Fronts Thermiques Sur les Interactions . . . . .	13
<b>2 Données, Méthodes et Outils</b>	<b>16</b>
2.1 Introduction . . . . .	17
2.2 Données . . . . .	17

2.2.1	Source des Données . . . . .	17
2.3	Période d'Étude . . . . .	20
2.4	Méthodes . . . . .	21
2.4.1	Prétraitement des Données . . . . .	21
2.4.2	Gestion des valeurs manquantes . . . . .	21
2.4.3	Méthodes de Traitement . . . . .	22
2.4.4	Filtrage des données . . . . .	23
2.4.5	Climatologie . . . . .	23
2.4.6	Analyse en ondelettes . . . . .	24
2.4.7	Analyse de corrélation déphasée et significativité Statistique . . . . .	24
2.4.8	Analyse Spatiale . . . . .	25
2.5	Description de l'outil KNN . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Résultats et discussions</b>	<b>27</b>
3.1	Présentation des Résultats des Données Manquantes . . . . .	28
3.1.1	Analyse des Données Manquantes . . . . .	28
3.1.2	Remplissage des Données Manquantes pour la SST . . . . .	29
3.1.3	Étude des données manquantes de la vitesse du vent . . . . .	31
3.1.4	Étude des données manquantes de la vitesse Melax par la méthode de régression linéaire . . . . .	33
3.1.5	Étude des données manquantes de la vitesse Melax avec l'Outil KNN	35
3.2	Résultats sur la Climatologie de la Zone d'étude . . . . .	36
3.3	Analyse des rétroaction SST-Vent dans la bande (10-90)-jours . . . . .	38
3.3.1	Analyse avec les corrélations déphasées . . . . .	38
3.3.2	Analyse des forçages de la SST cas par cas . . . . .	41
3.3.2.1	Identification des événements Potentiels de forçage de la SST par le Vent . . . . .	41
3.3.3	Analyses Spatiale des événements de Forçages . . . . .	42
3.3.4	Représentation des anomalies de pics Positifs . . . . .	43
<b>4</b>	<b>Conclusion et Perspectives</b>	<b>48</b>
4.1	Conclusion . . . . .	48
4.2	Perspectives . . . . .	49
<b>Références</b>		<b>52</b>
<b>Annexes</b>		<b>60</b>

# Liste des figures

1.1	Image montrant la côtes sénégalaises avec la bathymétrie le long de la côte et en croix magenta la localisation de l'aéroport de Dakar pour les mesures de vent. La bathymétrie est obtenu en combinant les données GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) 30' avec les données de bathymétrie du Centre de Recherche Océnographique de Dakar-Thiaroye (CRODT Source:( Ndoye, 2016 )). . . . .	5
1.2	Compléxité des Interactions Océan-Atmosphère (Neukermans et al., 2018) . . . . .	9
1.3	Illustration du mécanisme de Sweet, Source : (Thiam, 2024). . . . .	11
1.4	Illustration du mécanisme de Lindzen et Nigam, Source : ( Thiam, 2024 ). . . . .	12
1.5	Carte de la température de surface de la mer mesurée par MODIS, le 1er mai 2004, (Ndoye, 2016) montrant la plume d'upwelling du Sud Sénégal ainsi que le front. . . . .	14
2.1	Figures montrant: (a) la Position de la bouée Melax et (b) les capteurs associés avec une profondeur de mesure jusqu'à 35 m. . . . .	18
3.1	Série discontinue de la vitesse du vent au point Melax. . . . .	28
3.2	Série discontinue de la SST au point Melax avec la CDT de surface. . . . .	29
3.3	(a) Superposition entre la SST CTD (foncée) et celle de la thermistance (claire). (b) Diagramme de dispersion et droite de régression entre la SST CTD et Thermistance. . . . .	30
3.4	Série continue de la SST Melax CTD avec les périodes comblées ( en rouge ) par la Thermistance. . . . .	32
3.5	(a):Vitesse du vent Melax(rouge) Vs Vitesse du vent YOFF(bleu), et (b):Vitesse du vent Melax(rouge) Vs Vitesse du vent ERA5(bleu). . . . .	33
3.6	Diagrammes de dispersion et régressions entre les vitesses de vent : (a) entre Melax et YOFF, et (b) entre Melax et ERA5, la droite de regression linéaire est représentée en rouge et la droite en noir désigne la droite $Y = X$ . . . . .	34
3.7	Série continue de la vitesse du vent de Melax Complété par l'outil KNN (en Couleur Verte) . . . . .	36
3.8	Série Continue de Vent au point Melax. . . . .	36

3.9	Climatologies de la SST et de la vitesse du vent : (a) SST et vent représentés spatialement avec SST en Couleur et la vitesse du Vent en flèche, et (b) série temporelle du vent au point de Melax. . . . .	37
3.10	Diagramme de corrélation déphasée entre la SST et le Vent au Point Melax avec un Filtre Passe-bande (10-90)Jours et un seuil de significativité de 95%. . . . .	39
3.11	Analyse en ondelettes de la SST pendant les saisons froides (a) et chaudes (b) avec un seuil de significativité de 95%. . . . .	40
3.12	Figure montrant en (a) la superposition des séries temporelles des anomalies entre SST (noir) et vent au point Melax (magenta) et en (b) la superposition de la SST et le Vent avec les données ERA au point Melax. . . . .	42
3.13	Carte spatiale de l'événement positif de pic de SST observé le 1 Avril 2015 : la SSTA est représentée en couleur, l'anomalie de vitesse de vent en contour pointillé pour les anomalies négatives et en contour plein pour les anomalies positives. . . . .	43
3.14	Carte spatiale de l'événement positif de pic de SST observé le 23 Nov 2016 : la SSTA est représentée en couleur, l'anomalie de vitesse de vent en contour pointillé pour les anomalies négatives et en contour plein pour les anomalies positives. . . . .	44
3.15	Carte spatiale de l'événement négatif de pic de SST observé le 30 Nov 2015 : la SSTA est représentée en couleur, l'anomalie de vitesse de vent en contour pointillé pour les anomalies négatives. . . . .	45
3.16	Carte spatiale de l'événement négatif de pic de SST observé le 28 Mai 2016 : la SSTA est représentée en couleur, l'anomalie de vitesse de vent en contour pointillé pour les anomalies négatives. . . . .	46
.1	Figure montrant (a): la vitesse du vent Melax en rouge et ASCAT en bleu et (b): diagramme de dispersion entre Melax et ASCAT où la droite la droite de regression linéaire est représentée en rouge et la droite en noir désigne la droite $Y = X$ . . . . .	61
.2	Figure montrant (a): la vitesse du vent zonal Melax (rouge) et YOFF (bleu), (b): la vitesse du vent méridional Melax (rouge) et YOFF (bleu). . . . .	62
.3	Figure montrant la superposition des vents zonaux de Melax (jaune), ERA (rouge) et ASCAT ( bleu ). . . . .	62
.4	Figure montrant les variables filtrées (rouge) et non filtrées (noir) à l'intra-saisonnière (10-90)-jours avec (a): la SST Melax et (b): le vent Melax. . . . .	63

## Liste des tableaux

3.1 Coef. Statistiques: . . . . .	31
3.2 Tableau carastérisique des paramètres statistiques issues des données de vent:	34

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'océan et l'atmosphère forment deux systèmes en interaction mutuelle et continue. Recouvrant 71 % de la surface terrestre avec une profondeur moyenne de 3,7 km (Marshall et Plumb, 2007), l'océan constitue un vaste réservoir thermique pour l'atmosphère grâce à son contenu énergétique élevé et sa grande inertie thermique, due à sa forte masse volumique. Cette interaction se manifeste par des échanges constants d'énergie thermique via les flux de chaleur turbulents (latent et sensible). En conséquence, la réponse de l'atmosphère à un forçage externe est souvent plus rapide que celle de l'océan.

À l'interface air-mer délimitant la couche limite atmosphérique marine et la couche de mélange océanique, des échanges complexes d'énergie, d'humidité et de quantité de mouvement influencent non seulement le climat local, mais aussi des phénomènes atmosphériques globaux tels que les vents de surfaces et les précipitations. Ces interactions sont particulièrement marquées dans les zones côtières de bord est, où des phénomènes comme les upwellings et les fronts thermiques modifient les processus d'échange.

Historiquement, avant l'ère des satellites, les connaissances sur la variabilité spatio-temporelle des températures de surface de la mer (SST en anglais, abréviation utilisée dans le reste du document) et des vents provenaient de mesures ponctuelles réalisées à bord de navires. Ces relevés épars offraient une grille observationnelle grossière, révélant principalement une corrélation négative entre vents de surface et SST, interprétée comme une réponse passive de l'océan aux flux induits par le vent (Xie, 2004). Avec l'avènement des observations satellitaires, il a été constaté que dans des zones à forte activité de tourbillons et des fronts thermiques intenses, comme le courant des Aiguilles ou le Gulf Stream, les vents de surface sont localement plus forts au-dessus des eaux chaudes et plus faibles au-dessus des eaux froides. Cette corrélation positive indique que la SST peut également forcer la circulation atmosphérique locale (Small et al., 2008).

Deux mécanismes principaux expliquent ce couplage bidirectionnel : (1) les SST froides stabilisent la colonne atmosphérique, réduisant la turbulence et les vents, tandis que les SST chaudes favorisent l'instabilité et augmentent les vents (Sweet et al., 1981 ; Xie, 2004) ; (2) les variations de flux de surface modifient la pression atmosphérique, générant des circulations secondaires (Lindzen et Nigam, 1987). Ces mécanismes, appelés respectivement SW et LN, sont essentiels pour comprendre les interactions locales océan-atmosphère. Ces interactions présentent un intérêt crucial pour la société, notamment pour anticiper cer-

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

tains risques climatiques. Par exemple, une SST élevée est souvent nécessaire pour initier une convection profonde, avec un seuil situé autour de 26°-27°C selon les régions et les saisons (Graham et Barnett, 1987). Des études plus récentes ont également mis en évidence une modulation des vents et des précipitations saisonnières par les variations de la SST (Diakhaté et al., 2016 ; Wane et al., 2023).

Cependant, ces études reposent majoritairement sur des données de réanalyses et satellitaires, qui présentent des limites en zones côtières à cause des résolutions insuffisantes et de la complexité des interactions. Par conséquent, les modèles ont souvent tendance à lisser la variabilité des processus côtiers, ce qui entraîne des biais notables dans les prédictions climatiques régionales. Cela met en évidence la nécessité de coupler des observations in-situ avec des observations satellitaires à haute résolution pour mieux comprendre et modéliser ces phénomènes (Chelton et al., 2007). Les données in-situ, comme celles des bouées, offrent des mesures locales plus précises, particulièrement adaptées pour étudier les processus complexes dans ces régions.

Dans ce contexte, ce mémoire se propose d'utiliser les données in-situ de la bouée Melax pour étudier la rétroaction de l'océan sur l'atmosphère aux échelles intra-saisonnieres. Ce travail est structuré en quatres chapitres : le premier explore les caractéristiques océaniques et climatiques de la zone d'étude pour poser les bases contextuelles de l'analyse ; le deuxième décrit les données, les méthodes et les outils employés, incluant les approches spectrales et le traitement des données manquantes ; le troisième présente les résultats obtenus et les discute en profondeur, en mettant en évidence les mécanismes de rétroaction observés ; enfin, le dernier chapitre propose une synthèse des contributions de cette étude et ouvre des perspectives pour des recherches futures.

---

**CHAPITRE**

**1**

# Caractéristiques océaniques et climatiques de notre zone d'étude

## Sommaire

---

1.1	Introduction . . . . .	3
1.2	Importance des zones côtières sur les études de couplage Océan-atmosphère	4
1.3	Contexte Climatique et Océanique de la région sénégalaise . . . . .	6
1.4	Interactions Océan-Atmosphère . . . . .	8
1.4.1	Complexité des interactions Océan-Atmosphère . . . . .	8
1.4.2	Les mécanismes d'interactions Océan-atmosphère . . . . .	10
1.5	Effets des Upwellings et des Fronts Thermiques Sur les Interactions . . . . .	13

---

## 1.1 Introduction

La région côtière sénégalaise, située à la transition entre l'Afrique tropicale et subtropicale, offre un environnement unique pour l'étude des interactions océan-atmosphère. Grâce à sa position géographique stratégique et à la dynamique océanique qui la caractérise, cette zone présente des caractéristiques climatiques et océanographiques particulières qui influencent les processus atmosphériques régionaux. L'étude de ces interac-

## CHAPITRE 1. CARACTÉRISTIQUES OCÉANIQUES ET CLIMATIQUES DE NOTRE ZONE D'ÉTUDE

---

tions revêt une importance particulière dans le contexte de la compréhension globale des phénomènes de couplage océan-atmosphère (Nicholson et Grist, 2003).

Les courants océaniques tels que le courant des Canaries et le courant de Guinée jouent un rôle fondamental dans la régulation des SST(s) le long des côtes sénégalaises (Mittelstaedt, 1991). De plus, l'upwelling côtier, un phénomène majeur dans la région, contribue à des variations significatives de la SST et influence ainsi la circulation atmosphérique locale. Ces processus sont au cœur des interactions entre l'océan et l'atmosphère, générant des conditions favorables à la fois à la productivité biologique et aux échanges énergétiques entre les deux milieux.

Ce premier chapitre vise à introduire le contexte climatique et océanographique de la région sénégalaise et à souligner l'importance des zones côtières pour les études de couplage océan-atmosphère. Il aborde également la complexité de ces interactions et explore les phénomènes tels que les upwellings et les fronts thermiques, qui modulent les échanges d'énergie entre l'océan et l'atmosphère. Enfin, ce chapitre passera en revue les principales études antérieures sur les interactions océan-atmosphère dans la région, afin de poser les bases pour une meilleure compréhension des dynamiques locales et de leurs impacts à plus grande échelle.

### 1.2 Importance des zones côtières sur les études de couplage Océan-atmosphère

Notre étude se concentre sur les zones côtières du Sénégal (Figure 1.1), qui revêtent un intérêt scientifique majeur en raison des différences significatives entre les données in-situ et les observations satellitaires ou issues des modèles climatiques. Ces différences sont particulièrement notables pour des paramètres essentiels tels que la SST, le vent, ect . Les écarts, souvent appelés biais, entre les données satellitaires et in-situ, peuvent atteindre des valeurs élevées dans les environnements côtiers, où la dynamique océan-atmosphère est complexe et mal représentée dans les modèles numériques. Ces biais sont principalement dus à la résolution spatiale limitée des capteurs satellitaires et aux approximations faites dans les modèles globaux (Chelton et Xie, 2010).

Les zones côtières, comme celles du Sénégal, présentent des défis particuliers pour la modélisation climatique et les observations satellitaires en raison de la variabilité des processus locaux. En effet, des processus océaniques tels que l'upwelling côtier jouent un rôle crucial dans la régulation de la SST. Ces processus d'upwelling sont bien documentés dans les régions du courant de Benguela au large de l'Afrique australe, mais leur rôle spécifique sur les côtes sénégalaises est encore en cours d'investigation, notamment en

## CHAPITRE 1. CARACTÉRISTIQUES OCÉANIQUES ET CLIMATIQUES DE NOTRE ZONE D'ÉTUDE

---

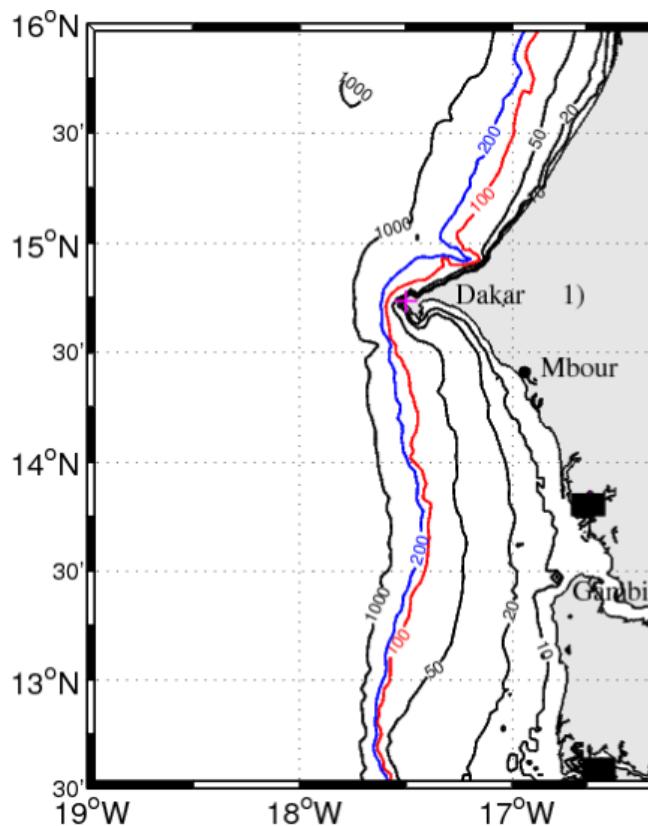


Figure 1.1: Image montrant la côtes sénégalaises avec la bathymétrie le long de la côte et en croix magenta la localisation de l'aéroport de Dakar pour les mesures de vent. La bathymétrie est obtenu en combinant les données GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) 30' avec les données de bathymétrie du Centre de Recherche Océanographique de Dakar-Thiaroye (CRODT Source:( Ndoye, 2016 )).

raison de la variabilité des vents qui les déclenchent (McGregor et Timmermann, 2011; Wooster et al., 1976).

L'importance des données in-situ dans l'amélioration de la compréhension des interactions océan-atmosphère est largement reconnue (Reynolds et al., 2007; Schott et al., 2009; Zhang et al., 2016). Ces données permettent non seulement de compléter les observations satellitaires, souvent limitées près des côtes, mais aussi d'offrir des mesures directes nécessaires à la validation des modèles climatiques et à l'amélioration de leur précision. En particulier, les données in-situ issues de bouées et de stations météorologiques jouent un rôle crucial dans la détection des variations locales de la SST, des vents et des courants, qui sont essentiels pour comprendre les mécanismes de couplage océan-atmosphère (Schott et al., 2009).

En outre, les conditions locales, telles que les courants côtiers et la topographie sous-marine, jouent un rôle fondamental dans la régulation des processus océaniques et atmosphériques dans ces zones. Les variations de la SST dues à l'upwelling et aux fluctuations des vents créent des environnements dynamiques qui influencent non seulement le climat

## CHAPITRE 1. CARACTÉRISTIQUES OCÉANIQUES ET CLIMATIQUES DE NOTRE ZONE D'ÉTUDE

---

régional mais aussi la productivité biologique et les régimes de pêche dans ces régions (Bakun, 1990; McClain et al., 2002). Enfin, la proximité des côtes et la dynamique océanique spécifique à ces zones côtières, comme celles observées au Sénégal, échappent souvent à la résolution des modèles climatiques globaux, qui sont conçus pour capturer les tendances à grande échelle. Cela renforce l'importance d'utiliser des observations in-situ à haute résolution pour améliorer les prévisions climatiques et mieux comprendre les échanges d'énergie, de chaleur et de matière à l'interface air-mer dans ces environnements. L'intégration de ces observations dans les modèles régionaux est cruciale pour affiner les prédictions climatiques et pour mieux comprendre les impacts des changements climatiques sur les zones côtières sénégalaises et ailleurs (Chelton et Xie, 2010; Small et al., 2008).

En analysant la figure 1.1, il apparaît que la côte sénégalaise présente des caractéristiques géographiques distinctes selon les régions. La partie nord et la partie sud de cette côte se différencient par leur bathymétrie et leur dynamique océanique. Ces particularités influencent fortement les processus océan-atmosphériques locaux.

La zone sud, où est positionnée la bouée utilisée dans cette étude, se trouve au cœur d'un système actif. Cette région se distingue par des interactions complexes entre les variations de la SST, les flux atmosphériques, et les processus de transport vertical influencés par la configuration côtière. Ces spécificités font de cette partie un lieu stratégique pour l'observation et l'analyse des interactions océan-atmosphère. La localisation précise de la bouée dans cette zone clé permet de capter des phénomènes d'échelle fine et offre une opportunité unique d'explorer comment ces interactions se manifestent dans un contexte fortement modulé par des facteurs locaux et régionaux. Ces données in-situ seront cruciales pour étudier les processus dynamiques complexes dans cette région, souvent caractérisée par une intense variabilité saisonnière et intrasaisonnière.

### 1.3 Contexte Climatique et Océanique de la région sénégalaise

La région sénégalaise, située sur la côte ouest de l'Afrique, présente une dynamique climatique riche, influencée par des processus atmosphériques et océaniques complexes. Elle est caractérisée par un climat tropical distinct, marqué par deux saisons principales : la saison sèche et la saison des pluies (Ndoye, 2016). La saison sèche, généralement de novembre à mai, est dominée par les alizés continentaux provenant du nord-est, qui apportent des conditions chaudes et sèches. Cette période coïncide avec une baisse notable des SST le long des côtes sénégalaises, en grande partie en raison du phénomène d'upwelling.

## CHAPITRE 1. CARACTÉRISTIQUES OCÉANIQUES ET CLIMATIQUES DE NOTRE ZONE D'ÉTUDE

---

Ce processus est déclenché par la combinaison de vents alizés intenses parallèles à la côte et de la force de coriolis, qui provoque le déplacement des eaux de surface vers le large, compensé par la remontée d'eaux froides et riches en nutriments des profondeurs océaniques . La baisse des SST, observée en particulier dans la région de la petite côte et de la grande côte, résulte de cette dynamique océanique, influencée par la topographie côtière et la direction des vents (Faye, 2015; Roy, 1989).

La presqu'île du Cap-Vert joue un rôle central dans la modulation de l'upwelling, influençant la distribution spatiale de la SST le long des côtes. Par exemple, au nord de la presqu'île, les alizés de nord-est (NE) induisent un upwelling marqué, tandis qu'au sud, les vents de nord-ouest (NW) favorisent un upwelling plus intense le long de la Petite Côte. Cette dynamique océanique varie en fonction des saisons et de l'orientation des vents (Roy, 1989). La variabilité de l'upwelling et son impact sur la SST ont des conséquences majeures sur les écosystèmes côtiers ainsi que sur les activités économiques, notamment la pêche, qui dépend fortement de la remontée des nutriments (Bakun, 1990).

Le processus d'upwelling, résultant du transport d'Ekman (Ekman, 1905), est un facteur clé de la régulation des conditions océaniques et atmosphériques locales. En générant un refroidissement de la surface de l'océan, il influence non seulement les températures de l'eau mais aussi les conditions météorologiques côtières. Le refroidissement de la SST est un indicateur direct de ce phénomène, qui a des implications sur la stabilité de l'atmosphère locale, favorisant parfois des conditions climatiques plus stables et sèches (Lindzen et Nigam, 1987).

En revanche, la saison des pluies, de juin à octobre, est caractérisée par l'influence de la mousson ouest-africaine. Pendant cette période, la migration vers le nord de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) entraîne l'arrivée de masses d'air humides en provenance de l'Atlantique, ce qui déclenche des précipitations abondantes. L'affaiblissement des alizés, combiné à la position nordique de la ZCIT, entraîne une accumulation d'eaux chaudes près des côtes, augmentant ainsi les SST (Lélé et al., 2015). Cette accumulation d'eaux chaudes est associée à une intensification de la convection atmosphérique, en particulier lorsque les SST atteignent des seuils critiques, généralement autour de 26°C-27°C, favorisant ainsi des orages et des précipitations intenses (Graham et Barnett, 1987; Waliser et al., 1993).

Les précipitations varient considérablement le long d'un gradient nord-sud, reflétant la variabilité des régimes climatiques régionaux. Au nord, les précipitations sont relativement faibles, atteignant environ 300 mm par an, tandis qu'au sud, elles peuvent dépasser 1 500 mm par an (Diedhiou et al., 2018). Cette différence est en grande partie due aux mouvements saisonniers de la ZCIT, qui influencent la distribution des précipitations (Hulme et al., 2001). La position de la ZCIT, ainsi que les anomalies de SST dans l'Atlantique

## CHAPITRE 1. CARACTÉRISTIQUES OCÉANIQUES ET CLIMATIQUES DE NOTRE ZONE D'ÉTUDE

---

tropical, modulent les régimes de précipitations, entraînant des variations importantes d'une année à l'autre. En particulier, des événements climatiques tels qu'El Niño et La Niña affectent les températures de surface de l'océan et, par conséquent, les régimes de précipitations dans la région (Nicholson et Grist, 2003).

L'interaction entre ces processus climatiques régionaux et la dynamique océanique a des implications significatives pour la compréhension du climat local. Par exemple, l'effet d'El Niño, qui tend à augmenter les SST dans le Pacifique, peut avoir des répercussions indirectes sur la mousson ouest-africaine en modifiant les modèles de circulation atmosphérique à grande échelle (Nicholson et Grist, 2003). De même, les variations de la ZCIT influencent la durée et l'intensité des saisons des pluies, ce qui affecte les pratiques agricoles et la disponibilité des ressources en eau dans toute la région (Lindzen et Nigam, 1987) .

Ces interactions océan-atmosphère sont cruciales pour comprendre les changements climatiques régionaux et leurs impacts. La complexité des processus qui régulent la SST, tels que l'upwelling, la mousson, et la variabilité de la ZCIT, nécessite une approche multidisciplinaire pour améliorer les modèles climatiques régionaux et élaborer des stratégies d'adaptation aux impacts du changement climatique (Bakun, 1990; McClain et al., 2002). Les observations in-situ, telles que celles effectuées par les bouées océaniques, sont essentielles pour affiner les prévisions climatiques et comprendre les biais des modèles globaux dans les zones côtières (Reynolds et al., 2007). Elles permettent de mieux saisir les variations locales de la SST et leur rôle dans la modulation des conditions climatiques régionales.

### 1.4 Interactions Océan-Atmosphère

#### 1.4.1 Complexité des interactions Océan-Atmosphère

Les interactions entre l'océan et l'atmosphère jouent un rôle fondamental dans la dynamique du climat terrestre, englobant une gamme de processus qui se déroulent à différentes échelles spatiales et temporelles. L'échange d'énergie et de matière à l'interface air-mer est au cœur de ces interactions. Ce transfert inclut des flux de chaleur latente et sensible, ainsi que des flux de matière sous forme d'humidité, d'aérosols marins, et de précipitations. Ces processus influencent directement les cycles de l'eau et de l'énergie à l'échelle globale (Trenberth et al., 2009), et jouent un rôle crucial dans la modération des climats régionaux, en particulier dans les zones côtières et les régions tropicales.

L'évaporation à la surface des océans est l'un des mécanismes principaux par lequel l'océan interagit avec l'atmosphère. L'évaporation est directement influencée par la SST,

## CHAPITRE 1. CARACTÉRISTIQUES OCÉANIQUES ET CLIMATIQUES DE NOTRE ZONE D'ÉTUDE

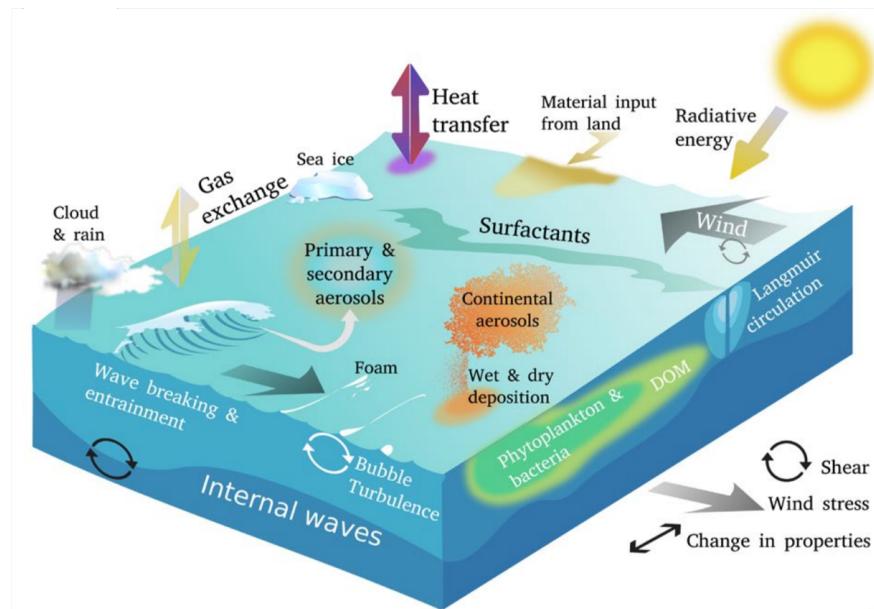


Figure 1.2: Compléxité des Interactions Océan-Atmosphère (Neukermans et al., 2018)

l'humidité relative de l'air et la vitesse des vents de surface (Fairall et al., 1996). Une SST plus élevée augmente le taux d'évaporation, ajoutant de l'humidité à l'atmosphère, ce qui peut intensifier les processus de convection et conduire à la formation de nuages convectifs et, potentiellement, de précipitations importantes. À l'inverse, une SST plus basse réduit le potentiel d'évaporation et stabilise la colonne atmosphérique, limitant la convection et la formation de nuages (Waliser et al., 1993; Xie, 2004a).

Les processus de conduction thermique et de friction entre l'océan et l'atmosphère sont également essentiels pour comprendre l'influence de l'océan sur le climat. Ces mécanismes influencent non seulement la dynamique de la circulation atmosphérique à grande échelle mais aussi les phénomènes météorologiques locaux. Le transfert de chaleur entre l'océan et l'atmosphère à travers la conduction thermique contribue à la redistribution de l'énergie solaire absorbée par l'océan, un processus essentiel pour le maintien de la circulation atmosphérique (Marshall et Plumb, 2007). En effet, l'océan agit comme un immense réservoir d'énergie, absorbant environ 93% de l'excès de chaleur généré par l'effet de serre anthropique (Levitus et al., 2012). Ce réservoir, par son inertie thermique, ralentit la réponse immédiate de l'atmosphère aux forçages climatiques tout en modulant les variations de températures à plus long terme.

Le vent, un vecteur crucial dans l'interaction air-mer, est souvent influencé par les gradients de température entre l'océan et l'atmosphère. Les anomalies de SST, qu'elles soient chaudes ou froides, génèrent des réponses dans la dynamique atmosphérique en modifiant les gradients de pression et, par conséquent, la circulation des vents (Chelton et Xie, 2010). Par exemple, les anomalies de SST associées à El Niño et La Niña dans le

## CHAPITRE 1. CARACTÉRISTIQUES OCÉANIQUES ET CLIMATIQUES DE NOTRE ZONE D'ÉTUDE

---

Pacifique tropical sont connues pour moduler les régimes de précipitation et les modèles de vent à l'échelle planétaire (Bjerknes, 1969; Philander, 1989).

La circulation océanique, y compris la circulation thermohaline et les courants de surface, joue un rôle clé dans la redistribution de la chaleur de l'équateur vers les pôles (Kuhlbrodt et al., 2007). Ce transport de chaleur par l'océan aide à maintenir le gradient de température global et influence les systèmes de haute et basse pression, qui dirigent les régimes de vent atmosphérique (Schmitz, 1996). L'inertie thermique de l'océan fait que celui-ci réagit plus lentement aux variations de l'atmosphère, un effet stabilisateur pour le climat terrestre. Par ailleurs, les océans jouent un rôle dans le cycle du carbone en absorbant environ 30% du  $(CO_2)$  anthropique, agissant comme un puits de carbone (Sabine et al., 2004).

### 1.4.2 Les mécanismes d'interactions Océan-atmosphère

Les études sur les interactions océan-atmosphère ont considérablement évolué depuis les premières observations faites à partir de navires, jusqu'aux analyses détaillées rendues possibles par les satellites. Durant les premières phases de cette recherche, les scientifiques ont observé des signatures de corrélations négatives entre la vitesse du vent et la SST, suggérant une réponse passive des océans aux forçages atmosphériques. Lorsqu'un vent fort souffle sur la surface de l'océan, il peut entraîner un refroidissement de la SST par plusieurs mécanismes. Tout d'abord, l'augmentation de l'évaporation joue un rôle clé dans ce processus. L'évaporation nécessite de l'énergie sous forme de chaleur latente, qui est extraite directement de l'océan. En transférant cette énergie dans l'atmosphère, l'eau en surface perd de la chaleur, ce qui entraîne une baisse de la température de l'océan (Xie, 2004). En parallèle, les vents forts peuvent aussi provoquer un mélange vertical des couches océaniques. Ce brassage permet aux eaux de surface, plus chaudes, de se mélanger avec des eaux plus profondes et plus froides, ce qui accentue le refroidissement de la SST. Ainsi, le vent a un double effet sur la température de surface de la mer : à la fois par l'évaporation et par le mélange des eaux, amplifiant le refroidissement. Toutefois, l'avènement des satellites a permis une révision de ce paradigme. Les corrélations positives observées entre la SST et les vents dans certaines régions côtières, dominées par des fronts océaniques marqués ou des phénomènes d'upwelling, ont révélé une rétroaction active des océans sur l'atmosphère (Chelton et Xie, 2010).

Deux mécanismes principaux ont été proposés pour expliquer cette rétroaction.

#### 1.4.2.1 Mécanisme d'ajustement vertical de Sweet

Le mécanisme d'ajustement vertical, souvent désigné par SW (Sweet et Wallace), tel que décrit par (Sweet et al., 1981; Wallace et al., 1989), postule que les variations de la SST influencent directement la stabilité de la couche limite atmosphérique marine (CLAM). Les eaux froides augmentent la stabilité de cette couche, ce qui réduit les flux turbulents de quantité de mouvement et ralentit les vents au-dessus. À l'inverse, les SST chaudes déstabilisent la colonne atmosphérique en renforçant le mélange turbulent dans la CLAM, ce qui accélère les vents dans ces zones (voir Figure 1.3).

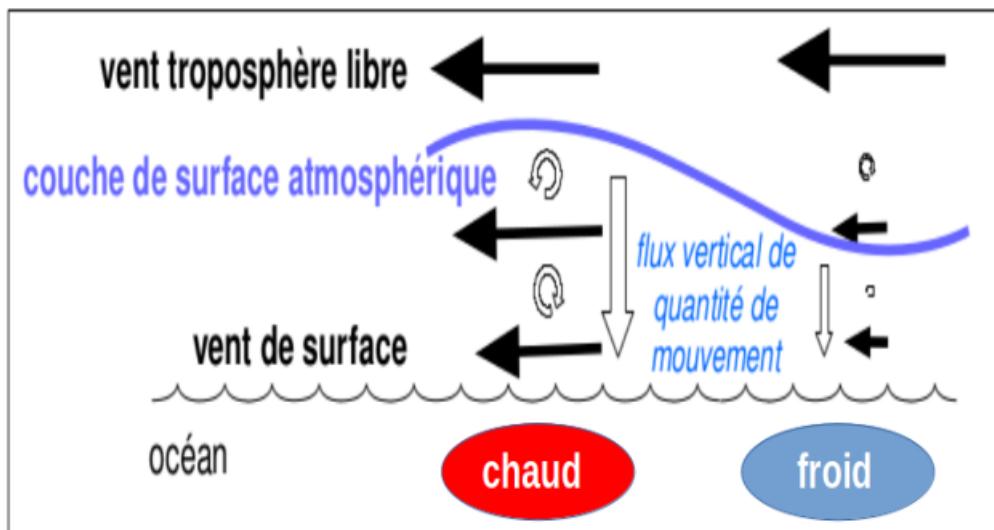


Figure 1.3: Illustration du mécanisme de Sweet, Source : (Thiam, 2024).

### 1.4.2.2 Mécanisme d'advection horizontale de Lindzen et Nigam

Le mécanisme d'advection horizontale, proposé par (Lindzen et Nigam, 1987) et connu sous le nom de mécanisme LN, repose sur les gradients de pression horizontaux générés par les contrastes de la SST (Figure 1.4). Ces gradients de pression déclenchent une circulation secondaire entre les zones de haute et basse pression résultant des variations de température. Plus précisément, les zones de SST élevée induisent une basse pression atmosphérique au-dessus, tandis que les zones de SST faible génèrent une haute pression. Ce différentiel de pression provoque des vents se dirigeant des zones de haute pression vers celles de basse pression, conformément aux travaux de (Wai et Stage, 1989).

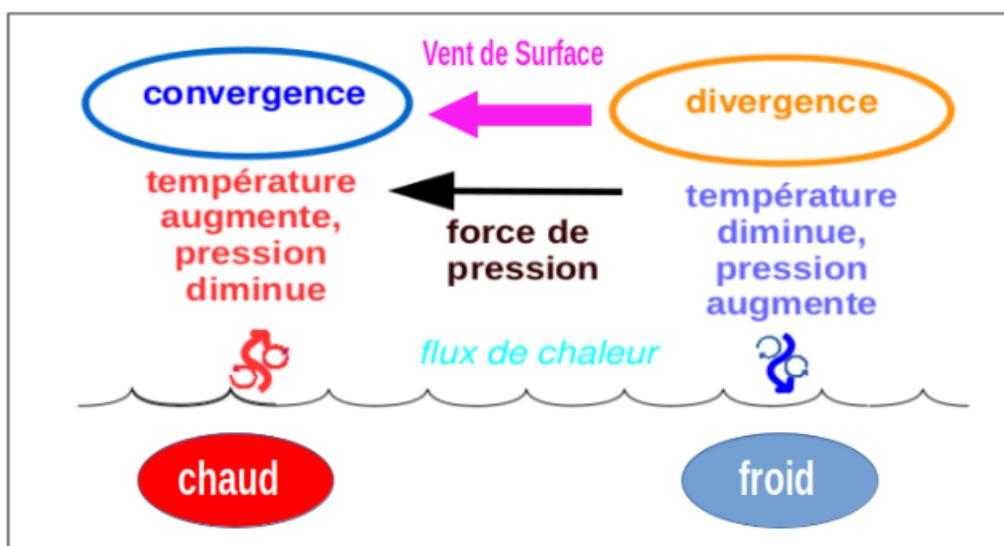


Figure 1.4: Illustration du mécanisme de Lindzen et Nigam, Source : ( Thiam, 2024 ).

Ces avancées ont conduit à une réévaluation du rôle de l'océan dans la variabilité atmosphérique, en particulier aux échelles de temps intra-saisonnieres et saisonnières. Aujourd'hui, un des objectifs principaux des chercheurs est de mieux comprendre les mécanismes impliqués dans les interactions air-mer à petite échelle, notamment aux fronts océaniques, qui peuvent avoir un impact significatif sur la variabilité climatique régionale (Diakhaté et al., 2016). Ces études sont d'une importance cruciale pour améliorer les modèles climatiques, car elles permettent de mieux prévoir les variations du climat et d'anticiper les risques climatiques futurs (Sutton et Hodson, 2005).

Parmi les nombreuses études portant sur les interactions océan-atmosphère, les travaux de (Diakhaté et al., 2018, 2016) constituent une référence importante. Ces recherches mettent en évidence le rôle clé de la rétroaction océanique sur l'atmosphère, en montrant comment la SST module directement les conditions atmosphériques, notamment la dynamique des vents et les régimes de précipitation. Diakhaté et ses collaborateurs ont démontré que la variabilité de la SST pouvait influencer significativement la circulation

## CHAPITRE 1. CARACTÉRISTIQUES OCÉANIQUES ET CLIMATIQUES DE NOTRE ZONE D'ÉTUDE

---

atmosphérique, créant ainsi une réponse locale sous forme de modifications des flux de vent et des modèles de précipitation, particulièrement dans les zones côtières où ces interactions sont les plus marquées.

De plus, une étude récente réalisée par (Wane et al., 2023) est venue confirmer cette rétroaction entre l'océan et l'atmosphère en s'appuyant sur des simulations atmosphériques forcées par des variations de la SST. Leurs résultats montrent que les changements de température de surface de l'océan peuvent entraîner des réponses atmosphériques notables, notamment au niveau des vents et des systèmes nuageux. Cela corrobore l'idée que l'océan joue un rôle déterminant dans le façonnement des processus atmosphériques au-dessus des régions marines, un phénomène qui peut s'amplifier en présence de conditions océanographiques particulières telles que l'upwelling ou la formation de fronts thermiques.

Il est important de souligner que la plupart des études existantes sur ce sujet se sont appuyées sur des données issues de produits satellitaires. Bien que les satellites offrent une couverture spatiale étendue et une observation continue, ils souffrent néanmoins de certains biais, en particulier dans les zones côtières, où les conditions océaniques et atmosphériques sont plus variables et complexes. En effet, la proximité des côtes introduit des incertitudes dans les mesures satellitaires, notamment à cause de la réflectivité des surfaces terrestres et des variations brusques des propriétés de l'océan.

C'est pourquoi, dans le cadre de la présente étude, il est primordial de se tourner vers l'utilisation de données in-situ pour analyser ces interactions. Les données in-situ, recueillies par des bouées, des stations météorologiques, offrent une précision et une fiabilité supérieures dans les régions côtières. Elles permettent d'approfondir notre compréhension des mécanismes de rétroaction entre la SST et les phénomènes atmosphériques locaux. L'un des objectifs de cette recherche est de démontrer, à travers l'utilisation de ces données in-situ, que la rétroaction océan-atmosphère observée dans les études précédentes existe bel et bien et peut même être plus prononcée dans certaines conditions, contribuant ainsi à la variabilité climatique régionale.

### 1.5 Effets des Upwellings et des Fronts Thermiques Sur les Interactions

Les régions présentant des fronts marqués de SST sont souvent considérées comme des zones clés pour l'étude des interactions océan-atmosphère. Ces fronts thermiques, qui se caractérisent par des variations abruptes de température sur des distances relativement courtes, influencent directement la circulation atmosphérique en surface, et jouent un rôle central dans la dynamique climatique régionale. Des études montrent que les vents de

## CHAPITRE 1. CARACTÉRISTIQUES OCÉANIQUES ET CLIMATIQUES DE NOTRE ZONE D'ÉTUDE

---

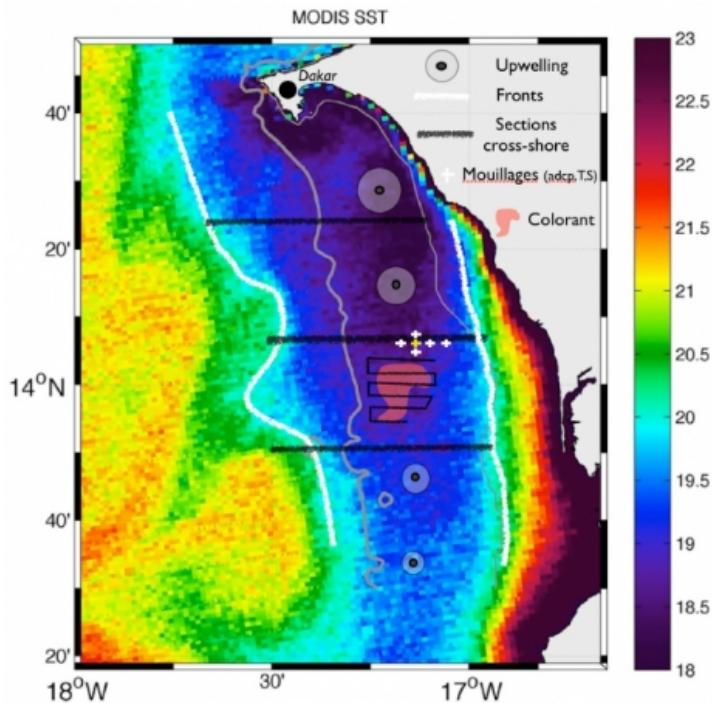


Figure 1.5: Carte de la température de surface de la mer mesurée par MODIS, le 1er mai 2004, (Ndoye, 2016) montrant la plume d’upwelling du Sud Sénégal ainsi que le front.

surface réagissent rapidement aux gradients de SST, modifiant leur intensité et direction selon les contrastes thermiques observés (Chelton et Xie, 2010). En effet, dans les régions où la SST change brusquement, la stabilité atmosphérique est affectée, entraînant des variations de la vitesse des vents et des échanges de chaleur océan-atmosphère.

Les études utilisant des données satellitaires ont grandement contribué à la compréhension de ce phénomène. Les observations satellitaires fournissent une couverture spatio-temporelle continue et détaillée des conditions de SST et de vent, permettant d’identifier les régions où ce couplage est particulièrement marqué. (Xie, 2004) a démontré que la réponse des vents de surface aux variations de la SST est particulièrement forte dans les zones océaniques caractérisées par des fronts thermiques, notamment dans les régions subtropicales et tropicales. (Small et al., 2008) ont également confirmé que les changements de SST pouvaient modifier les flux atmosphériques locaux, créant ainsi des boucles de rétroaction complexes entre l’océan et l’atmosphère.

Ces processus sont particulièrement pertinents dans les environnements côtiers, où les phénomènes dynamiques locaux tels que l’upwelling et la formation de fronts thermiques jouent un rôle central dans les interactions océan-atmosphère. L’upwelling, qui consiste en la remontée d’eaux froides et riches en nutriments des profondeurs océaniques vers la surface, modifie la SST locale, créant des gradients thermiques qui influencent directement les vents de surface (Bakun, 1990). Dans les zones d’upwelling, comme les côtes de

## CHAPITRE 1. CARACTÉRISTIQUES OCÉANIQUES ET CLIMATIQUES DE NOTRE ZONE D'ÉTUDE

---

l'Afrique de l'Ouest, la SST chute brusquement, ce qui entraîne des changements dans la couche limite atmosphérique et affecte les régimes de vent (Schwing et al., 2002).

Les fronts thermiques, où deux masses d'eau de températures contrastées se rencontrent, jouent également un rôle important dans la modulation des conditions atmosphériques locales. Ces fronts créent des gradients de température qui influencent non seulement les vents de surface, mais aussi les régimes de précipitation, et peuvent favoriser la formation de nuages à petite échelle(Wentz et al., 2000). Dans les zones côtières, la présence de tels fronts thermiques peut accentuer les échanges énergétiques entre l'océan et l'atmosphère, augmentant ainsi la variabilité climatique régionale (Chelton et al., 2004).

**CHAPITRE**

**2**

# Données, Méthodes et Outils

## Sommaire

---

2.1	Introduction . . . . .	17
2.2	Données . . . . .	17
2.2.1	Source des Données . . . . .	17
2.3	Période d'Étude . . . . .	20
2.4	Méthodes . . . . .	21
2.4.1	Prétraitement des Données . . . . .	21
2.4.2	Gestion des valeurs manquantes . . . . .	21
2.4.3	Méthodes de Traitement . . . . .	22
2.4.4	Filtrage des données . . . . .	23
2.4.5	Climatologie . . . . .	23
2.4.6	Analyse en ondelettes . . . . .	24
2.4.7	Analyse de corrélation déphasée et significativité Statistique . . . . .	24
2.4.8	Analyse Spatiale . . . . .	25
2.5	Description de l'outil KNN . . . . .	26

---

## 2.1 Introduction

L'accent est mis sur l'intégrité des données, ce qui implique une collecte rigoureuse, un traitement approprié et une gestion minutieuse des valeurs manquantes. Ces étapes sont essentielles pour assurer la validité des résultats. Ce chapitre abordera les différentes sources de données, qu'elles proviennent de mesures *in situ*, comme celles de la bouée Melax, ou de produits de réanalyse. Nous préciserons également la période d'étude choisie, qui est essentielle pour contextualiser les résultats.

Le prétraitement des données sera discuté en détail, y compris la gestion des valeurs manquantes, qui est un enjeu majeur dans les études océaniques et atmosphériques. L'utilisation de l'outil KNN (K-Nearest Neighbors, en anglais) pour estimer les valeurs manquantes permettra de garantir une série temporelle continue, essentielle pour des analyses précises. Enfin, les différentes méthodes statistiques et les techniques d'analyse appliquées à ces données seront explorées, montrant comment elles contribuent à une meilleure compréhension des interactions entre l'océan et l'atmosphère.

Ainsi, ce chapitre vise à établir une base solide pour l'analyse, en soulignant l'importance des données dans la recherche scientifique et en garantissant la rigueur méthodologique nécessaire pour interpréter les résultats obtenus.

## 2.2 Données

### 2.2.1 Source des Données

Pour cette étude, nous avons utilisé plusieurs sources principales de données :

#### Données Melax

Une bouée Melax, signifiant "Éclaire" en Wolof, a été déployée le 11 février 2015 à la position géographique 14°20,8'N – 17°13,68'W, à 30 km au large de Mbour, par A. Lazar et D. Dausse, à une profondeur de 35 mètres (Figure 2.1b). Cette bouée est située dans une région connue pour ses phénomènes d'upwelling, qui modifient la SST et influencent les conditions atmosphériques locales (Ndoye et al., 2017). L'équipement de la bouée inclut des capteurs mesurant continuellement la SST via des thermistances et la Conductivité, Température, Profondeur (CTD pour Conductivity, Temperature, Depth en anglais), la vitesse et la direction du vent à 10 mètres, ainsi que d'autres variables océan atmosphériques. Ces données sont essentielles pour compléter et valider les observations satellitaires et les modèles de réanalyse concernant les interactions

océan-atmosphère à différentes échelles temporelles.

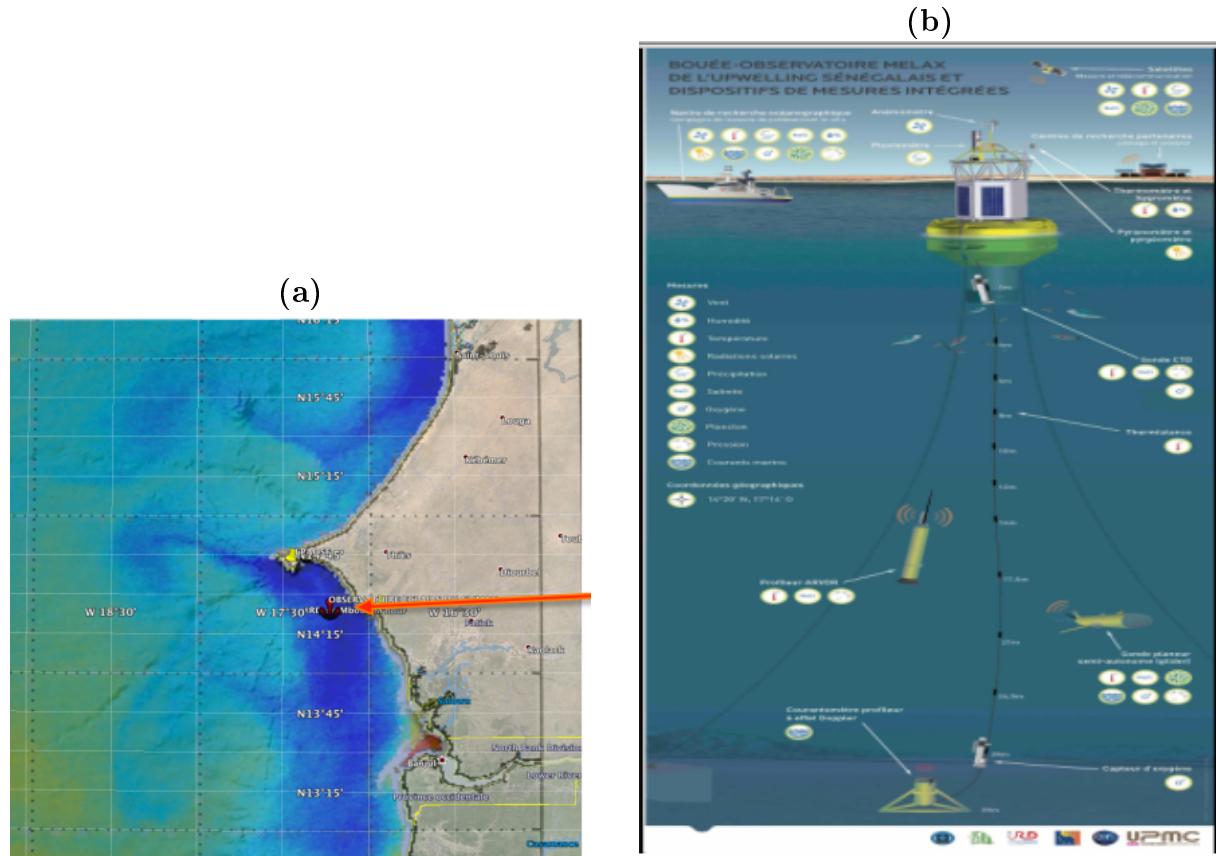


Figure 2.1: Figures montrant: (a) la Position de la bouée Melax et (b) les capteurs associés avec une profondeur de mesure jusqu'à 35 m.

### Données de la station DWS (Yoff)

Les observations de la station Dakar Weather Station (DWS), également connues sous le nom de Meteorological Airport Report (METAR, en anglais), proviennent d'un anémomètre situé à l'aéroport international Léopold Sedar Senghor de Dakar ( $14.44^{\circ}\text{N}$ ,  $17.30^{\circ}\text{W}$ ) à une altitude de 27 m, avec une fréquence d'acquisition de 30 minutes. Ces données, téléchargeables depuis le site <http://www.ogimet.com/metars.phtml>, offrent l'avantage d'une disponibilité quasi continue et à haute fréquence. Toutefois, l'inconvénient majeur de ces observations réside dans leur localisation terrestre, qui ne reflète pas nécessairement les conditions océaniques, en particulier dans la zone sud du Sénégal qui nous intéresse spécifiquement.

Pour traiter ces données, nous avons utilisé un script en Bash afin d'extraire et de convertir les valeurs de vitesse de vent contenues dans les fichiers METAR, qui incluaient

à l'origine des codes textuels complexes. Ce traitement automatisé nous a permis de récupérer les informations pertinentes, en filtrant les erreurs et en structurant les données sous un format exploitable pour les analyses ultérieures.

### **Données satellitaires ASCAT**

Les données de vent provenant du satellite Advanced Scatterometer (ASCAT) ont été utilisées pour compléter les mesures de vent manquantes. ASCAT fournit des estimations de la vitesse et de la direction du vent à la surface de l'océan avec une résolution spatiale adéquate pour les études côtières. Ces données ont été précieuses pour analyser les régimes de vent sur la région d'étude et améliorer la couverture des périodes manquantes dans les données in-situ.

### **Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST)**

Le produit Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST) est une base de données quotidienne de la température de surface de la mer, fournie par la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Ce produit combine des observations satellitaires, des mesures in situ de bouées et de navires, et utilise un modèle d'interpolation optimal pour générer des estimations précises de la SST à une résolution spatiale de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ . Les données couvrent une période étendue, incluant les années de 2000 à 2018, et sont disponibles via le site NOAA OISST.

L'OISST est largement utilisé dans les études océanographiques pour évaluer les variations à grande échelle de la SST et pour détecter les anomalies thermiques importantes comme les phénomènes d'upwelling et de downwelling. Ces données sont essentielles pour notre étude car elles permettent de suivre les changements thermiques dans la zone côtière sénégalaise, influencés par les régimes de vents locaux et les courants océaniques.

### **Global Ocean Reanalysis and Simulation (Glorys)**

Le produit Glorys est une réanalyse océanique globale de haute résolution, développée par le programme Copernicus Marine Service (CMEMS). Il s'agit d'un produit de réanalyse disponible avec une résolution spatiale de  $1/4^\circ$ , qui fournit des informations détaillées sur les vents, les courants, la température, la salinité, et d'autres variables océanographiques importantes. Les données de Glorys couvrent la période de 2000 à 2018, correspondant à la période d'analyse choisie dans cette étude. Elles sont particulièrement utiles pour l'analyse des vents de surface et des interactions entre

l'océan et l'atmosphère dans notre zone d'étude. La base de données Glorys est accessible via le site Copernicus Marine Service.

### Données de réanalyse ERA 5

Nous avons également intégré les données de réanalyse ERA5, fournies par le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF). ERA5 est une réanalyse climatique qui couvre la période de 1950 à nos jours, et elle a été développée pour fournir une vue complète des conditions atmosphériques. La date de création de ce produit remonte à 2016, avec des mises à jour régulières afin d'améliorer la qualité et la résolution des données. Les données ERA5 offrent une résolution de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , permettant d'obtenir des informations détaillées sur divers paramètres météorologiques, y compris les vents de surface. Ces informations sont cruciales pour analyser les interactions entre l'océan et l'atmosphère, notamment en ce qui concerne les régimes de vent et leur impact sur les conditions océaniques. Les données de réanalyse sont basées sur un ensemble d'observations et sont traitées à l'aide de modèles numériques, ce qui permet d'améliorer la précision des prévisions et des analyses climatiques (Hersbach et al., 2020). Les données ERA5 sont accessibles au public et peuvent être téléchargées via le site web de Copernicus Climate Change Service (C3S), offrant ainsi une ressource précieuse pour les chercheurs et les praticiens s'intéressant aux études climatiques et océanographiques.

## 2.3 Période d'Étude

La période d'étude de cette recherche s'étend du 11 février 2015, date à laquelle la bouée Melax a été mise en place, jusqu'au 7 décembre 2016. Cette période a été choisie en raison de la disponibilité d'une série de données collectées par la bouée. Ces données comprennent des mesures cruciales telles que la SST et la vitesse du vent, qui sont essentielles pour analyser les interactions entre l'océan et l'atmosphère. L'installation de la bouée Melax a permis de recueillir des informations précieuses sur les conditions océaniques locales, facilitant ainsi une meilleure compréhension des dynamiques côtières durant cette période.

## 2.4 Méthodes

### 2.4.1 Prétraitement des Données

Le prétraitement des données a constitué une étape essentielle dans notre étude, et il a été structuré en plusieurs phases. La première phase a consisté à collecter les données de la SST et de la vitesse du vent, qui ont été recueillies à une fréquence de 10 minutes.

Lors de cette collecte, nous avons rencontré des valeurs aberrantes, notamment des valeurs du vent marquées par le code 9999, qui sont souvent utilisées pour indiquer des données manquantes ou incorrectes. Pour éviter que ces valeurs erronées n'affectent l'analyse ultérieure, nous les avons remplacées par des NaN (Not a Number). Cela permet de préserver l'intégrité de notre jeu de données en s'assurant que ces anomalies ne biaisent pas nos résultats.

Ensuite, nous avons calculé des moyennes journalières à partir des données prétraitées. Cette étape est cruciale pour la suite de notre étude, car elle nous permet d'analyser les tendances quotidiennes des SST et des vents, facilitant ainsi une meilleure compréhension des interactions entre l'océan et l'atmosphère. En consolidant les données à une échelle quotidienne, nous pouvons mieux évaluer les fluctuations diurnes et intra-saisonnieres, ce qui est fondamental pour nos analyses.

### 2.4.2 Gestion des valeurs manquantes

Les données in-situ collectées par la bouée Melax constituent une base essentielle pour analyser les interactions complexes entre l'océan et l'atmosphère le long des côtes sénégaloises. Ces données ont permis d'établir une série temporelle riche en informations, couvrant plusieurs variables telles que la SST et la vitesse du vent. Cependant, cette série présente des lacunes importantes. En particulier, les mesures de vent et de SST comportent des périodes d'absence de données, compromettant ainsi l'intégralité de l'analyse.

Concernant les données de vent, une interruption majeure s'est produite entre le 30 août 2015 et le 17 octobre 2016, coïncidant avec le passage du cyclone Fred dans la région (Dieng et al., 2019; Jenkins et al., 2017). Ce phénomène météorologique extrême a provoqué des dysfonctionnements au niveau des capteurs installés sur la bouée Melax, perturbant la collecte des données. Ce dysfonctionnement a affecté la qualité des mesures de vent pendant une longue période, créant un vide dans les données cruciales pour les analyses atmosphériques. De plus, des interruptions similaires ont été observées dans la série temporelle de la SST, principalement dues à des problèmes techniques liés à la sonde CTD, responsable des mesures de température. Ces dysfonctionnements de l'instrumentation ont causé des absences de données sur plusieurs périodes.

Pour combler ces lacunes, nous avons d'abord tenté d'exploiter d'autres jeux de données. Nous avons ainsi utilisé les données de réanalyse ERA5, des données in-situ de la station de Yoff, ainsi que des données satellitaires issues du radiomètre ASCAT. Ces sources ont été comparées aux données de Melax à l'aide d'une méthode de régression linéaire, similaire à celle utilisée par (Tall et al., 2021) . La relation entre les variables est exprimée par l'équation suivante :

$$X_{\text{Melax}} = a \cdot X_{\text{Auxiliaire}} + b \quad (2.1)$$

où  $X_{\text{Melax}}$  représente la valeur de la SST ou du vent mesurée par la bouée Melax,  $X_{\text{Auxiliaire}}$  désigne la SST de la thermistance ou les données de vent alternatives (ERA5, Yoff, ASCAT), **a** est le coefficient de corrélation, et **b** correspond au biais. Cette méthode a permis d'évaluer l'alignement entre les données manquantes et les sources auxiliaires. Cependant, malgré cette approche, nous avons constaté des biais importants dans les données de vent provenant des autres sources. Ces biais ont rendu difficile une substitution précise des valeurs manquantes, affectant ainsi la fiabilité des données complétées par cette méthode.

Face à ces limitations, nous avons adopté une approche plus robuste en utilisant le modèle KNN. Ce modèle, mis en œuvre via Python, s'est révélé plus efficace pour estimer les valeurs manquantes des vitesses du vent.

Quant aux données de la SST, les mesures des thermistances disponibles ont joué un rôle clé. En effet, les thermistances ont démontré une forte corrélation avec les données de la sonde CTD, nous permettant de remplacer les valeurs manquantes de manière plus fiable. Cette approche combinée nous a donc permis de combler efficacement les lacunes dans nos données, assurant ainsi une continuité indispensable pour mener à bien les analyses des interactions océan-atmosphère. Cette méthodologie a non seulement renforcé la qualité de nos données, mais a également permis de mieux comprendre les phénomènes sous-jacents dans la région d'étude, notamment l'impact des vents sur la dynamique océanique locale.

### 2.4.3 Méthodes de Traitement

Dans cette section, nous présentons les méthodes utilisées pour combler les données manquantes dans les séries temporelles de la SST et du vent. Deux approches principales ont été mises en œuvre pour traiter ces données incomplètes : une méthode basée sur l'utilisation des jeux de données existants pour la SST et le vent, et une méthode basée sur l'utilisation de l'algorithme K-nearest neighbors (KNN).

#### 2.4.4 Filtrage des données

Un filtre passe-bande Lanczos avec une plage de périodes de 10 à 90 jours a été utilisé pour isoler la variabilité intrasaisonnière des données. Le choix de ce filtre repose sur sa capacité à minimiser l'effet de bord et à offrir une meilleure sélectivité des fréquences par rapport aux filtres classiques, tout en préservant la précision temporelle (Duchon, 1979). La plage de 10 à 90 jours est couramment utilisée pour analyser les processus atmosphériques et océanographiques à ces échelles, car elle capture les oscillations pertinentes liées aux variations intrasaisonnières, tout en filtrant les signaux de plus courte durée et les tendances de longue période (Blackmon, 1976).

#### 2.4.5 Climatologie

Dans le cadre de notre étude, la climatologie de la zone côtière sénégalaise a été analysée à l'aide des données ERA5 Glorys, sur la période allant de 2000 à 2018. L'objectif était d'établir une base de référence climatologique pour comprendre les interactions entre la SST et les régimes de vent, et leurs impacts sur les processus océaniques régionaux comme l'upwelling.

##### Extraction des points proches de la bouée Melax

Pour une représentation précise des conditions climatiques dans notre zone d'étude, nous avons extrait les points de données les plus proches de la bouée Melax en fonction des résolutions des produits OISST ( $0,25^\circ$ ) et Glorys ( $1/12^\circ$ ), nous avons utilisé des méthodes d'interpolations pour regriller les données à une résolution commune. Cette extraction nous a permis d'obtenir des données spécifiques aux conditions côtières, qui sont essentielles pour la compréhension des phénomènes locaux.

##### Analyse climatologique

Les données extraites ont été utilisées pour effectuer une analyse climatologique sur plusieurs paramètres, notamment la température de surface de la mer et les vents. Une moyenne climatologique annuelle a été calculée à partir des données journalières pour caractériser les régimes de SST et de vent dans la zone d'étude. Nous avons également calculé des moyennes mensuelles et des anomalies par rapport à la moyenne climatologique pour identifier les tendances à long terme et les phénomènes saisonniers, tels que l'upwelling côtier.

### 2.4.6 Analyse en ondelettes

Dans cette étude, l'analyse en ondelettes a été réalisée à l'aide de MATLAB pour analyser la variabilité temporelle et fréquentielle des séries de SST et des vents. Cette méthode est particulièrement adaptée aux séries non stationnaires, typiques des phénomènes climatiques tels que les upwellings et les oscillations intra-saisonnieres.

L'ondelette de Morlet, bien adaptée aux séries environnementales (Nakken, 1999), a été utilisée pour décomposer les séries temporelles en une représentation temps-fréquence, permettant ainsi d'identifier les périodes durant lesquelles des variations importantes se produisent.

Les paramètres utilisés dans l'analyse, tels que la fréquence centrale et l'échelle, sont ceux par défaut dans MATLAB, conformément aux recommandations du guide pratique de (Torrence et Compo, 1998). Une description détaillée des calculs effectués par le logiciel est disponible dans la documentation de MATLAB.

### 2.4.7 Analyse de corrélation déphasée et significativité Statistique

L'analyse de corrélation déphasée est un outil statistique essentiel pour examiner la relation entre deux séries temporelles, comme la SST et la vitesse du vent. Cette méthode permet d'évaluer dans quelle mesure ces deux variables sont liées à travers différentes échelles temporelles et spatiales. Elle est particulièrement utile dans les études océan-atmosphère, où l'interaction entre les variables peut être influencée par des décalages temporels, c'est-à-dire que les variations dans une série (par exemple, la SST) peuvent précéder ou suivre celles de l'autre série (par exemple, le vent).

Dans cette étude, un test de significativité statistique a été appliqué pour s'assurer que les corrélations observées ne sont pas dues au hasard. Pour cela, un seuil de significativité a été fixé à  $\alpha = 0,05$ , correspondant à un niveau de confiance de 95%. Cela signifie que nous acceptons une probabilité de 5% de rejeter une hypothèse nulle qui serait en réalité vraie, autrement dit, d'affirmer à tort qu'il existe une corrélation statistiquement significative. Le test de significativité repose sur le calcul de la statistique  $t$ , obtenue à partir du nombre d'observations disponibles dans chaque série temporelle. Les degrés de liberté ( $df$ ) sont calculés en soustrayant deux au nombre total d'observations, soit  $df = n - 2$ , où  $n$  représente le nombre d'observations. Pour déterminer si la corrélation observée est significative, la valeur critique de  $t$  est calculée à partir de la loi de Student, à un niveau de confiance de 95%. La formule utilisée pour convertir la valeur critique de  $t$  en coefficient de corrélation critique  $r_{crit}$  est la suivante :

$$r_{\text{crit}} = \sqrt{\frac{t_{\text{crit}}^2}{t_{\text{crit}}^2 + d_f}} \quad (2.2)$$

Cette formule permet d'identifier le seuil à partir duquel la corrélation observée est considérée comme significative. Si la valeur absolue de la corrélation observée est supérieure à  $r_{\text{crit}}$ , alors la corrélation est statistiquement significative au niveau de 95 %. Cela nous permet de déterminer si les variations dans la SST et le vent, observées à travers l'analyse de corrélation déphasée, sont véritablement liées ou si elles peuvent être attribuées à des fluctuations aléatoires.

L'utilisation de ce test est courante dans les études de climatologie et d'océanographie pour s'assurer que les résultats sont robustes et scientifiquement valides (Thomson et Emery, 2014; Wilks, 2011). En fixant un seuil de signification rigoureux, cette approche garantit que les interactions océans-atmosphère étudiées, telles que celles liées aux phénomènes d'upwelling ou à l'influence des alizés sur la SST, reposent sur des bases statistiques solides et peuvent être interprétées avec confiance.

#### 2.4.8 Analyse Spatiale

L'analyse spatiale est une méthode couramment utilisée en climatologie pour mettre en évidence l'évolution spatio-temporelle de variables sur une grille (comme la SST) en fonction des variations d'une série temporelle spécifique. Dans notre étude des interactions océan-atmosphère, cette méthode nous a permis d'étudier la relation entre la SST et la réponse du vent en fonction des variations temporelles observées.

Plutôt que d'utiliser un indice climatique global (comme un indice El Niño), notre approche s'est concentrée sur l'identification des pics de SST qui précèdent ceux des vents, en utilisant les données in situ de la bouée Melax. Les périodes pertinentes ont été définies sur la base de ces pics de SST observés dans les séries temporelles de chaque saison (chaude et froide). Les dates de ces événements ont ensuite été utilisées pour extraire des données à 2 dimensions issues des réanalyses ERA5 pour les composantes zonales et méridiennes du vent ( $u$  et  $v$  à 10 m), ainsi que des données OISST pour la SST.

La première étape a consisté à identifier les dates des événements où un pic de SST précède un pic de vent, en définissant ces jours comme lag 0. Pour chaque lag 0, une analyse spatiale a été réalisé afin de caractériser la distribution spatiale de la SST et du vent à ce moment précis. Ensuite, des analyses supplémentaires ont été tracés pour des lags supérieurs afin d'observer la réponse progressive de l'atmosphère (le vent) au forçage océanique (la SST), jusqu'à atteindre le pic de réponse du vent.

## 2.5 Description de l'outil KNN

Le modèle KNN est une méthode d'apprentissage supervisé largement utilisée pour la régression et la classification. Il repose sur le principe de proximité, où les prédictions pour une instance donnée sont basées sur les valeurs de ses voisins les plus proches dans l'espace des caractéristiques. Cette approche est particulièrement adaptée pour les séries temporelles, où les valeurs passées peuvent fournir des informations significatives sur les valeurs futures.

Dans le cadre de notre étude, nous avons appliqué le modèle KNN pour estimer les valeurs manquantes de la vitesse du vent à partir des données de la bouée Melax. En utilisant une série temporelle, nous avons d'abord créé des caractéristiques laggées, c'est-à-dire que pour chaque point de données, nous avons extrait les valeurs des périodes précédentes afin de prédire la valeur actuelle. Ce processus est crucial pour capturer les dépendances temporelles dans les données.

Une fois les caractéristiques préparées, nous avons formé le modèle KNN sur un ensemble d'entraînement constitué de ces caractéristiques. Le choix du nombre de voisins ( $k$ ) est un paramètre clé, influençant la sensibilité du modèle aux variations dans les données. Dans notre cas, nous avons opté pour un  $k$  égal à 1, ce qui signifie que la prédiction pour chaque point de données était basée uniquement sur son voisin immédiat le plus proche. Cette méthode a permis de saisir des fluctuations instantanées dans la série temporelle.

Les performances du modèle KNN ont été évaluées à l'aide de l'erreur absolue moyenne (Mean Absolute Error, MAE), un indicateur courant pour mesurer l'exactitude des prévisions. Ce processus d'évaluation a révélé la capacité du modèle à combler efficacement les lacunes dans les données de vent, ce qui a été particulièrement crucial pour notre analyse des interactions océan-atmosphère.

Le modèle KNN a été introduit par (Cover et Hart, 1967) et a été largement étudié pour sa simplicité et son efficacité dans divers domaines. Selon (Altman, 1992), le KNN est particulièrement efficace lorsque les relations entre les variables sont complexes et non linéaires, ce qui en fait un choix pertinent pour les applications environnementales. De plus, sa capacité à s'adapter à des distributions de données variées le rend précieux dans des contextes où d'autres méthodes pourraient échouer. En somme, le modèle KNN constitue un outil essentiel pour notre étude, permettant de surmonter les défis posés par les données manquantes et d'améliorer la continuité de notre série temporelle.

---

**CHAPITRE**

**3**

# Résultats et discussions

## Sommaire

---

3.1	Présentation des Résultats des Données Manquantes . . . . .	28
3.1.1	Analyse des Données Manquantes . . . . .	28
3.1.2	Remplissage des Données Manquantes pour la SST . . . . .	29
3.1.3	Étude des données manquantes de la vitesse du vent . . . . .	31
3.1.4	Étude des données manquantes de la vitesse Melax par la méthode de régression linéaire . . . . .	33
3.1.5	Étude des données manquantes de la vitesse Melax avec l’Outil KNN	35
3.2	Résultats sur la Climatologie de la Zone d’étude . . . . .	36
3.3	Analyse des rétroaction SST-Vent dans la bande (10-90)-jours . . . . .	38
3.3.1	Analyse avec les corrélations déphasées . . . . .	38
3.3.2	Analyse des forçages de la SST cas par cas . . . . .	41
3.3.3	Analyses Spatiale des événements de Forçages . . . . .	42
3.3.4	Représentation des anomalies de pics Positifs . . . . .	43

---

Cette section présente et analyse les résultats obtenus à partir des données collectées et des méthodes appliquées dans le cadre de cette étude. Elle explore la manière dont les observations soutiennent ou remettent en question les hypothèses formulées, tout

en mettant en évidence les dynamiques sous-jacentes aux interactions océan-atmosphère dans la région étudiée. En particulier, l'accent sera mis sur les variations de la SST et des vents, ainsi que sur leur influence mutuelle à différentes échelles spatio-temporelles. À travers une analyse approfondie des résultats, nous chercherons à comprendre les mécanismes clés qui régissent ces interactions et à interpréter les phénomènes observés à la lumière des études précédentes. Enfin, les résultats seront comparés aux recherches existantes pour situer cette étude dans un cadre scientifique plus large, tout en soulignant les implications pratiques et les perspectives de recherche future.

## 3.1 Présentation des Résultats des Données Manquantes

### 3.1.1 Analyse des Données Manquantes

La bouée a permis de collecter des séries de données couvrant notre période d'étude. Cependant, quelques discontinuités liées à des perturbations sont observées dans ces séries de mesures. Pour les données de vent, on note une période totale de 47 jours de données manquantes (Figure 3.1), s'étendant du 30 août 2015 au 17 octobre 2015, période durant laquelle le passage du cyclone Fred a été documenté (Dieng et al., 2019).

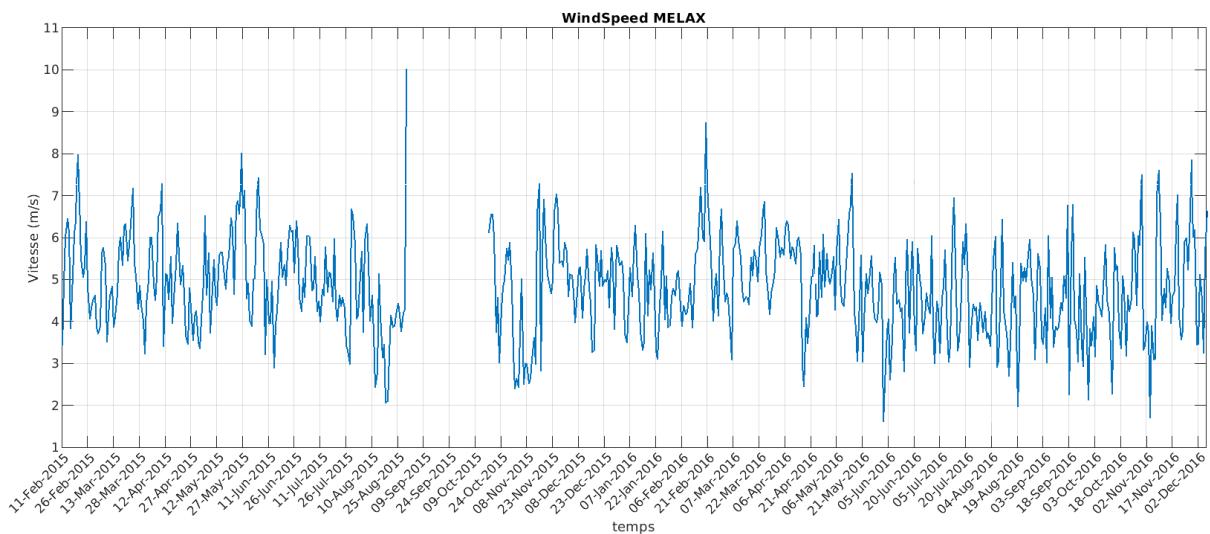


Figure 3.1: Série discontinue de la vitesse du vent au point Melax.

En ce qui concerne la SST, des discontinuités apparaissent également, bien que sur des périodes plus courtes que celles observées pour le vent. Ces discontinuités se répètent trois fois au cours de la période d'étude, avec des intervalles irréguliers (Figure 3.2).

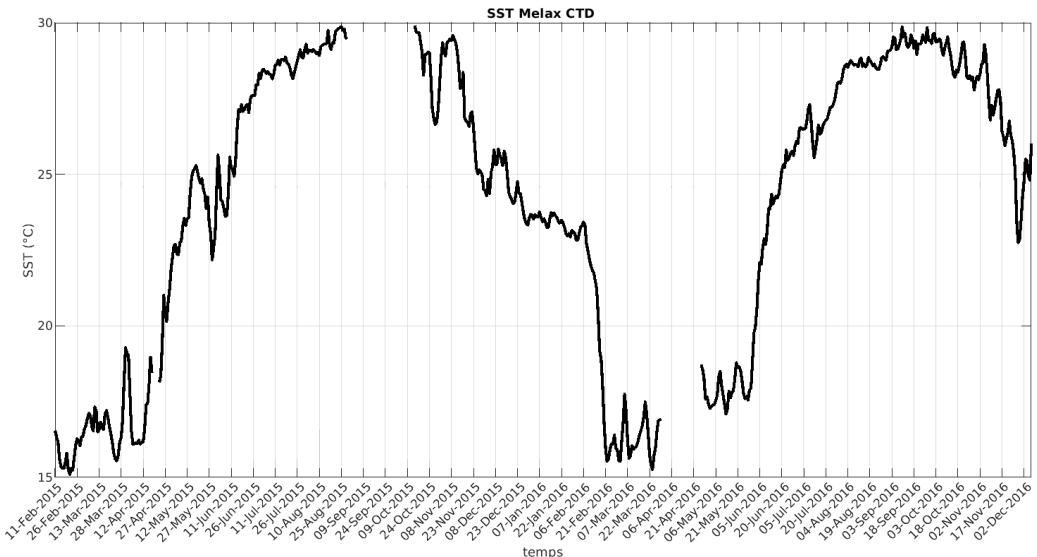


Figure 3.2: Série discontinue de la SST au point Melax avec la CDT de surface.

### 3.1.2 Remplissage des Données Manquantes pour la SST

Pour la SST, une approche basée sur la régression linéaire a été utilisée afin de combler les lacunes des données manquantes. Cette méthode repose sur l'établissement d'une relation linéaire entre les données de la CTD, dont certaines valeurs étaient manquantes, et celles de la thermistance, qui fournissait une série continue. La méthode de (Tall et al., 2021) a permis de montrer que la SST mesurée par la CTD et la thermistance présente une corrélation élevée, ce qui justifie l'utilisation de la régression linéaire pour estimer les valeurs manquantes dans les données de la SST. Ce processus a permis de compléter les périodes de discontinuité observées dans les séries de SST.

## CHAPITRE 3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

---

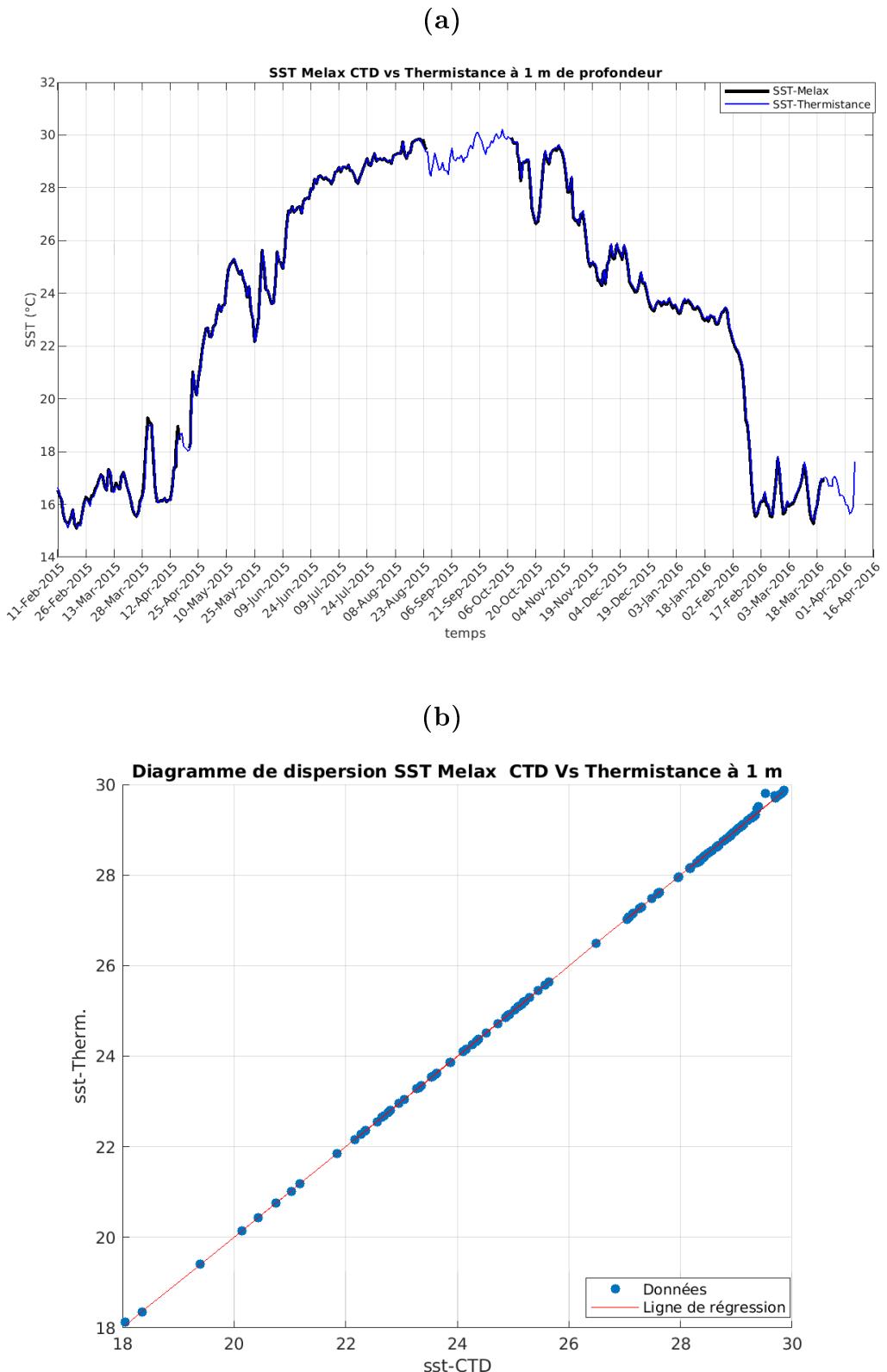


Figure 3.3: (a) Superposition entre la SST CTD (foncée) et celle de la thermistance (claire). (b) Diagramme de dispersion et droite de régression entre la SST CTD et Thermistance.

Table 3.1: Coef. Statistiques:

	a	b(biais)	r	R <sup>2</sup>
CTD Vs Thermistance	0.9993	0.0155	0.9999	0.999883

Où le coefficient de détermination  $R^2$  représente la proportion de la variance de la variable dépendante, ici la SST mesurée par la CTD de surface, qui est expliquée par la variable indépendante, c'est-à-dire les mesures de la thermistance, dans un modèle de régression linéaire. En d'autres termes, il quantifie dans quelle mesure les variations des données observées de la CTD sont prédites par les données de la thermistance. Un  $R^2$  élevé, proche de 1, indique que la majorité des variations de la SST mesurée par la CTD peut être expliquée par les mesures de la thermistance, confirmant ainsi la solidité de la relation entre ces deux ensembles de données.

L'analyse approfondie de ces résultats a mis en évidence une corrélation linéaire très solide entre les mesures de la SST obtenues à partir de la CTD de surface et celles recueillies par la thermistance. Cette relation fiable nous a offert une solution efficace pour traiter les périodes où des données manquaient. En effet, en substituant les valeurs manquantes par celles de la CTD de surface, nous avons pu maintenir la continuité des séries temporelles de la SST sur toute la période d'observation. Cette démarche est essentielle, car une série temporelle continue est primordiale pour garantir la robustesse des analyses ultérieures, notamment en ce qui concerne l'examen des variations climatiques et océaniques à différentes échelles temporelles. La continuité des données nous permet également de mieux évaluer les phénomènes d'interaction océan-atmosphère dans la zone d'étude, sans interruption dans les enregistrements, ce qui pourrait autrement biaiser les résultats. Comme illustré dans la Figure 3.4, cette méthode a assuré une couverture complète des données, renforçant ainsi la fiabilité des conclusions qui seront tirées de l'analyse.

### 3.1.3 Étude des données manquantes de la vitesse du vent

Comme mentionné dans les pages précédentes, les données incomplètes de vent ont nécessité plusieurs tentatives pour être complétées, afin d'obtenir une série temporelle plus longue et continue. Dans un premier temps, nous avons entrepris des études comparatives avec divers jeux de données. Parmi ceux-ci figurent les données in-situ de la station de Yoff, située près de la côte sénégalaise, ainsi que les observations satellites provenant des missions ASCAT et OSTIA. En parallèle, les réanalyses ERA5 ont également été intégrées à l'analyse. Toutefois, ces différentes sources ont montré des biais significatifs, ce qui n'a pas permis de combler de manière satisfaisante les périodes manquantes dans les données

## CHAPITRE 3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

---

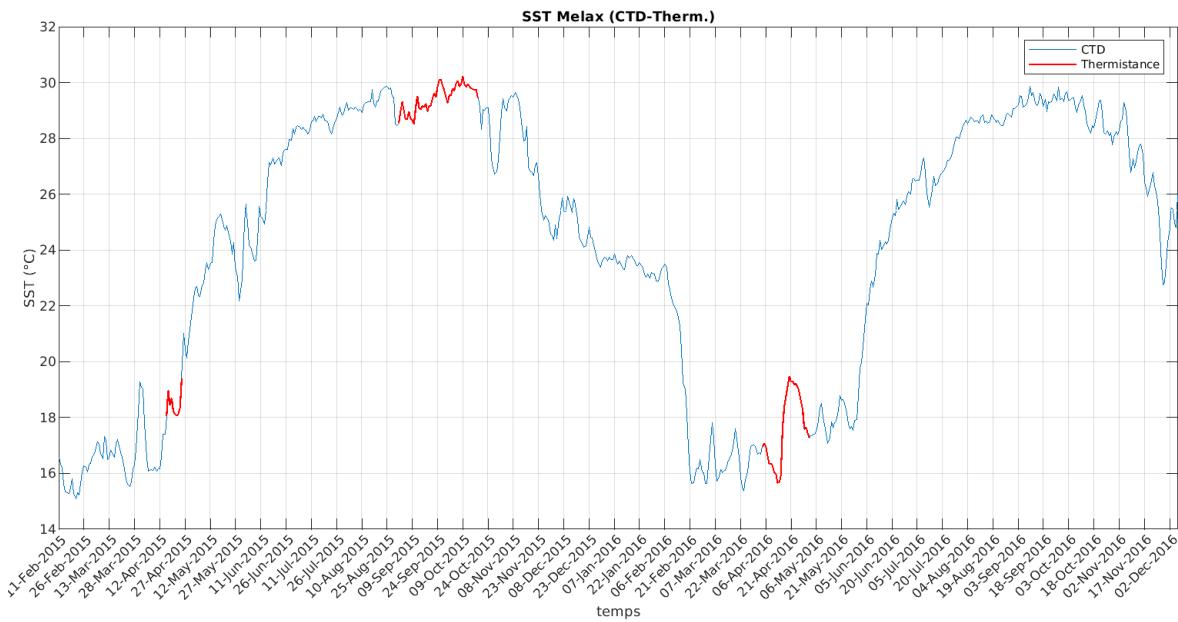


Figure 3.4: Série continue de la SST Melax CTD avec les périodes comblées ( en rouge ) par la Thermistance.

de vent.

Face à ces limites, l'utilisation d'approches alternatives s'est avérée nécessaire. C'est ainsi que nous avons opté pour l'outil KNN, un algorithme d'apprentissage supervisé, qui s'est révélé particulièrement adapté pour traiter ce problème de données manquantes. En s'appuyant sur les informations disponibles des périodes adjacentes, KNN a permis de générer des estimations fiables des valeurs de vent manquantes, assurant ainsi la continuité et la robustesse de la série temporelle. Cette approche a considérablement amélioré la qualité de l'ensemble de données, tout en minimisant les incertitudes liées aux biais des autres sources de données.

### 3.1.4 Étude des données manquantes de la vitesse Melax par la méthode de régression linéaire

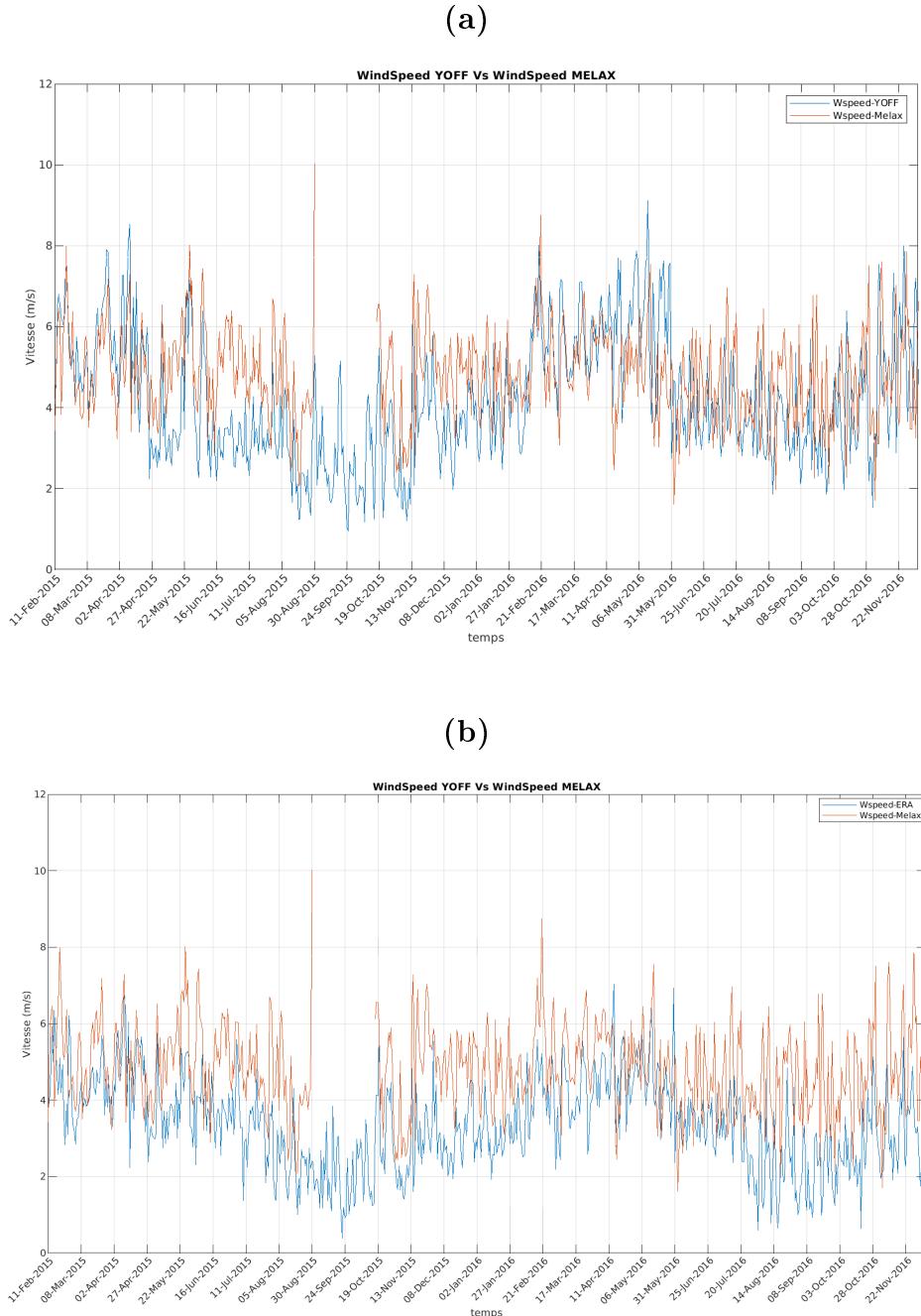


Figure 3.5: (a):Vitesse du vent Melax(rouge) Vs Vitesse du vent YOFF(bleu), et (b):Vitesse du vent Melax(rouge) Vs Vitesse du vent ERA5(bleu).

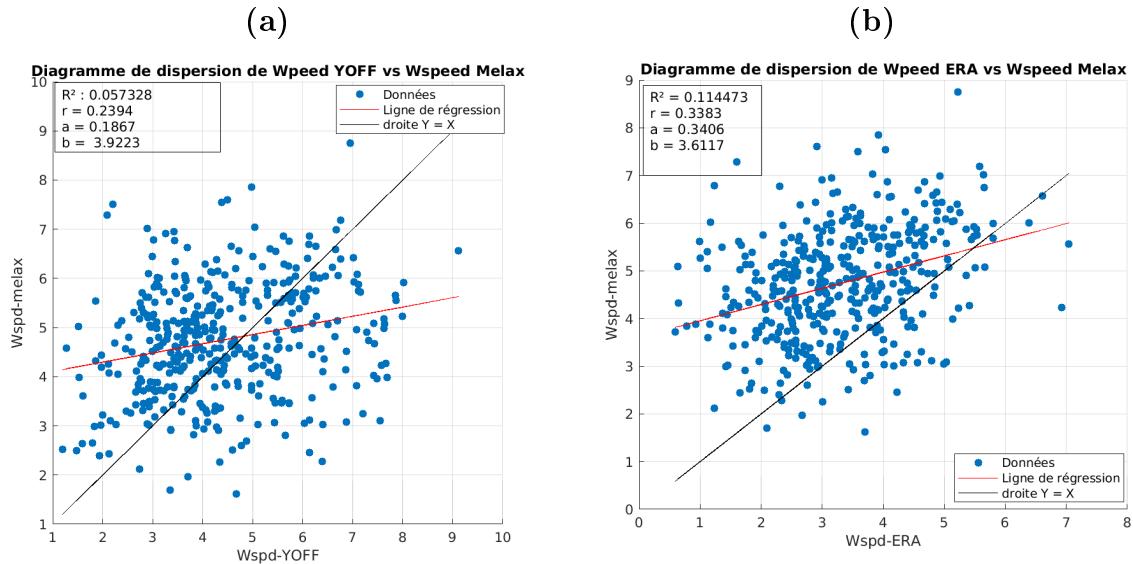


Figure 3.6: Diagrammes de dispersion et régressions entre les vitesses de vent : (a) entre Melax et YOFF, et (b) entre Melax et ERA5, la droite de regression linéaire est représentée en rouge et la droite en noir désigne la droite  $Y = X$ .

Table 3.2: Tableau caractéristique des paramètres statistiques issues des données de vent:

	a	b(biais)	r	$R^2$
Melax/YOFF	0.1867	3.9223	0.2394	0.057328
Melax/ERA	0.3405	3.6117	0.3383	0.114473

Les paramètres obtenus à partir des différentes sources de données dans cette section indiquent clairement que les produits utilisés pour tenter de compléter les données manquantes de vent à la station Melax présentent des biais importants. Ces écarts, parfois considérables, démontrent que les estimations fournies par ces jeux de données ne sont pas en adéquation avec les observations in situ. En outre, le coefficient de détermination  $R^2$ , qui mesure la proportion de la variance des données expliquée par ces produits, s'est avéré très faible. Ce résultat montre que ces jeux de données ne parviennent à capturer qu'une fraction limitée des variations réelles du vent observées à Melax.

L'analyse révèle que les jeux de données satellitaires ou de réanalyse présentent des biais systématiques ainsi que des limites dans leur capacité à reproduire fidèlement les fluctuations temporelles et spatiales du vent, en particulier à proximité des côtes. Ces limitations réduisent leur efficacité pour combler les lacunes dans les séries temporelles de vent in situ, et les tentatives réalisées n'ont pas permis d'améliorer de manière significative la qualité globale des séries temporelles. Néanmoins, ces produits trouvent leur pertinence dans d'autres types d'analyses. En effet, dans le cadre d'études de cas spécifiques menées

à des échelles plus vastes, leur couverture spatio-temporelle étendue et leur cohérence globale apportent une valeur ajoutée significative (Hersbach et al., 2020).

### 3.1.5 Étude des données manquantes de la vitesse Melax avec l’Outil KNN

Devant les incompatibilités significatives entre les données mesurées à la station Melax et les divers produits utilisés pour tenter de combler les lacunes dans les données, nous avons décidé d’adopter une méthode plus avancée : l’apprentissage automatique supervisé à travers l’outil KNN. Contrairement aux techniques classiques, cette approche permet une gestion plus précise et efficace des données manquantes (voir Figure 3.7).

Le principe du KNN repose sur l’identification des données les plus proches ou les plus similaires parmi les observations existantes. Pour notre étude, nous avons utilisé les données disponibles de la station Melax, couvrant une période allant du 17 octobre 2015 au 7 décembre 2016, comme base d’entraînement pour l’algorithme (représentant la plus longue série de données disponible).

L’application de cette méthode a non seulement amélioré la continuité des données de vent, mais elle a également assuré que les tendances naturelles des mesures *in situ* soient respectées, réduisant ainsi les erreurs liées aux interpolations ou autres approches statistiques. Cette technique s’est révélée particulièrement bénéfique dans un contexte où les méthodes classiques, basées sur des produits satellitaires ou des réanalyses, n’ont pas permis de combler efficacement les lacunes des données. Grâce au KNN, nous avons pu obtenir une série temporelle de vent plus fiable et représentative, essentielle pour les analyses subséquentes. À l’issue de cette étude, nous avons réussi à reconstituer une série temporelle complète des données de vent au point de la bouée Melax (Figure 3.8). Cette reconstruction constitue une avancée essentielle, car elle permet de disposer d’une base de données cohérente et continue, indispensable pour les analyses à venir. Grâce à cette série complétée, il sera désormais possible d’étudier en détail les rétroactions de la SST sur le vent durant la période d’étude.

La continuité des données de vent est cruciale pour analyser avec précision les interactions océan-atmosphère, en particulier pour évaluer comment les variations de la SST influencent les régimes de vent locaux. Ces informations sont essentielles pour mieux comprendre les mécanismes de couplage entre l’océan et l’atmosphère, ainsi que leur rôle dans la dynamique climatique régionale, notamment dans la zone côtière sénégalaise. La série de données complétée nous ouvre ainsi la voie à des études plus approfondies, visant à mieux cerner les processus de rétroaction entre la SST et le vent à différentes échelles temporelles et spatiales.

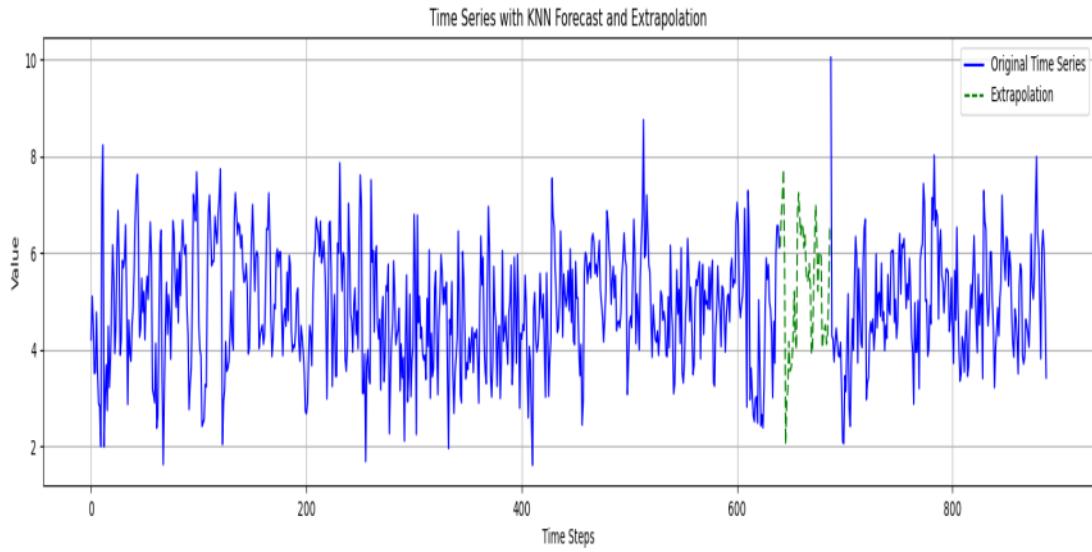


Figure 3.7: Série continue de la vitesse du vent de Melax Complété par l'outil KNN (en Couleur Verte)

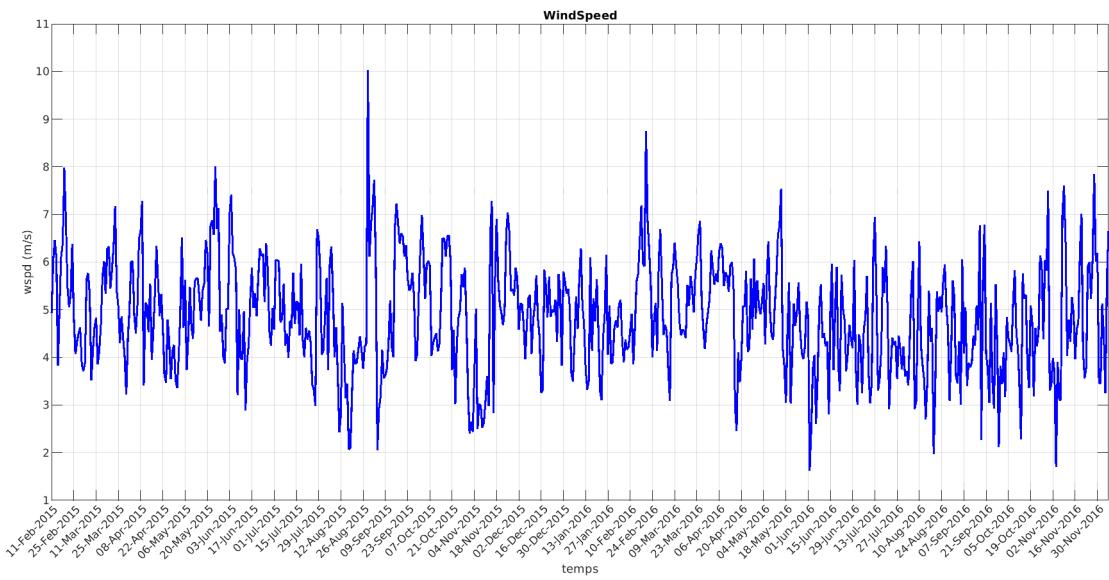


Figure 3.8: Série Continue de Vent au point Melax.

### 3.2 Résultats sur la Climatologie de la Zone d'étude

Les résultats climatiques de notre zone d'étude présentés dans la Figure 3.9, montrent des variations saisonnières des régimes de vent et de la SST. Sur la Figure 3.9a on peut voir que la saison froide, de novembre à mai, se caractérise par une baisse notable de la SST, due principalement à l'upwelling, un phénomène causé par les alizés forts soufflant parallèlement à la côte et la force de Coriolis. Ces facteurs entraînent une dérive des eaux de surface vers le large, permettant la remontée d'eaux profondes froides, ce qui réduit

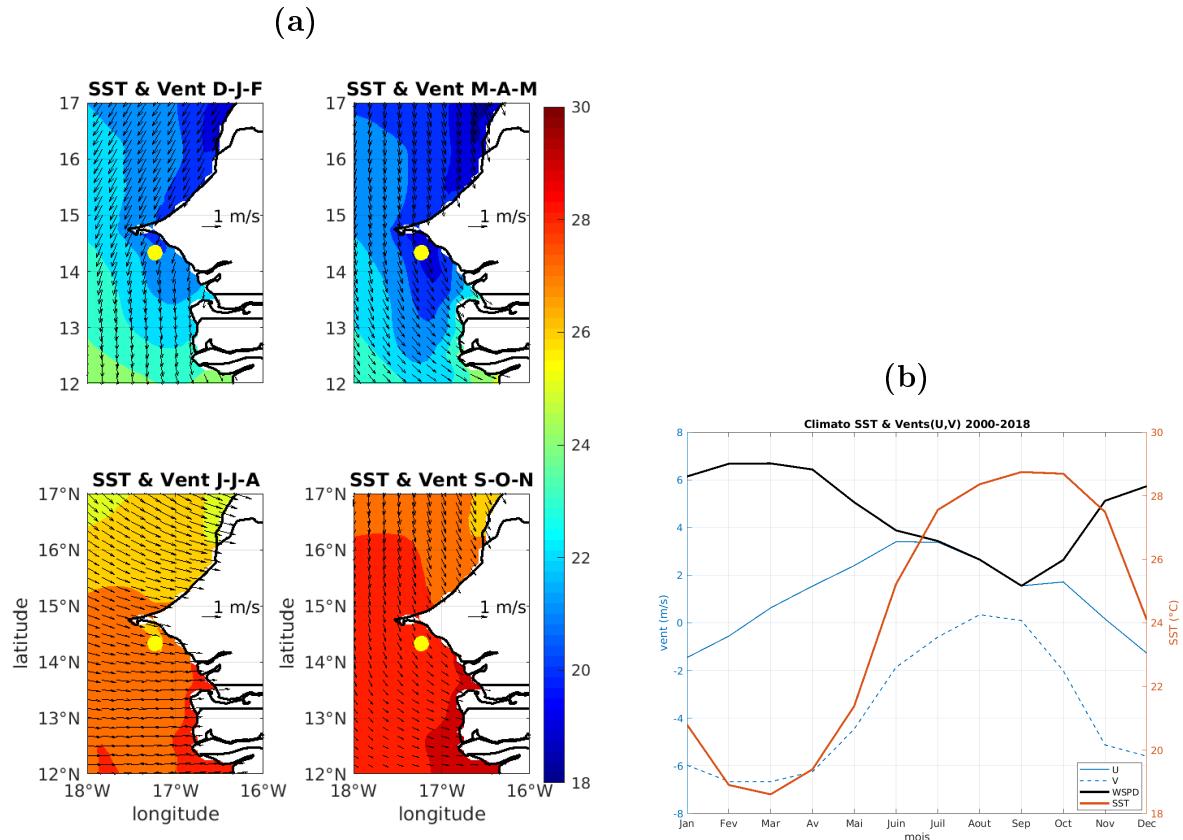


Figure 3.9: Climatologies de la SST et de la vitesse du vent : (a) SST et vent représentés spatialement avec SST en Couleur et la vitesse du Vent en flèche, et (b) série temporelle du vent au point de Melax.

la SST alors que pour la période de Juin à Octobre on note une augmentation de la SST du à un ralentissement des alizés qui favorise une accumulation des eaux près de la côte consistant à augmenter la température de l'océan sous l'effet du l'ensoleillement.

La Figure 3.9b, qui montre la climatologie au point de la bouée sur la petite côte, illustre la relation entre la SST et les composantes du vent (zonal, méridien et vitesse). Elle met en évidence le refroidissement des eaux côtières entre novembre et mai, en lien avec l'intensification des vents du nord, qui favorisent l'upwelling. Ce phénomène est renforcé par l'augmentation de la vitesse du vent, qui intensifie l'évaporation et le mélange des eaux, contribuant à un refroidissement supplémentaire de la SST.

Les observations confirmées par des études antérieures (Bakun, 1990; Diakhhaté et al., 2016) montrent que ce refroidissement est également lié à l'effet du transport d'Ekman. En effet, les vents parallèles à la côte déplacent les eaux de surface vers le large, favorisant ainsi la remontée d'eaux froides des profondeurs pour compenser ce déplacement.

L'interaction entre l'upwelling, l'évaporation et l'intensification des vents forme un système de rétroaction complexe qui influence directement la SST et les conditions clima-

tiques locales. Cette dynamique est essentielle pour comprendre les variations saisonnières de la SST et des régimes de vent le long des côtes sénégalaises (Chelton et al., 2004; Xie, 2004).

En résumé, l'analyse montre que les processus d'upwelling et de mélange turbulent jouent un rôle central dans la dynamique océan-atmosphère, influençant la SST et les conditions climatiques régionales de manière interconnectée.

### 3.3 Analyse des rétroaction SST-Vent dans la bande (10-90)-jours

#### 3.3.1 Analyse avec les corrélations déphasées

Dans cette analyse, nous avons tracé le diagramme de corrélation déphasée appliquée aux anomalies filtrées en utilisant un filtre passe-bande (10-90 jours) sur les séries continues de SST et de vent au point Melax, après traitement des valeurs manquantes. Ce filtrage spécifique nous a permis de nous concentrer sur une échelle de temps intra-saisonnière, ce qui est crucial pour examiner les interactions dynamiques entre l'océan et l'atmosphère sur des périodes plus courtes que les cycles saisonniers typiques.

Sur le diagramme (Figure 3.10), les lags positifs représentent un forçage de la SST sur la vitesse du vent, où la SST prend l'initiative du couplage (SST Lead). Autrement dit, un lag positif indique que les variations de la SST précèdent la réponse de la vitesse du vent. Inversement, les lags négatifs représentent un forçage de l'atmosphère sur l'océan (SST Lag), suggérant que les variations du vent influencent celles de la SST. Ce type d'analyse est essentiel pour identifier les délais de réponse spécifiques entre l'océan et l'atmosphère, et pour comprendre comment ces systèmes interagissent sur différentes échelles de temps (Hurrell et Deser, 2010).

En se focalisant sur ces lags, nous pouvons mieux interpréter les mécanismes sous-jacents aux interactions océan-atmosphère, notamment dans les zones côtières où des processus comme les upwellings peuvent jouer un rôle significatif dans la modulation des échanges thermiques et énergétiques. Cette approche nous permet ainsi de déceler les périodes où l'un des systèmes domine l'autre, en fonction des conditions environnementales locales.

L'analyse de ce diagramme révèle une cohérence notable en ce qui concerne le processus de forçage, comme le démontre le signe des corrélations observées. Les corrélations négatives indiquent un forçage atmosphérique, avec une réponse océanique consécutive, tandis que les corrélations positives suggèrent que l'océan, à son tour, exerce une rétroaction sur l'atmosphère. Cependant, une observation plus approfondie met en évidence une

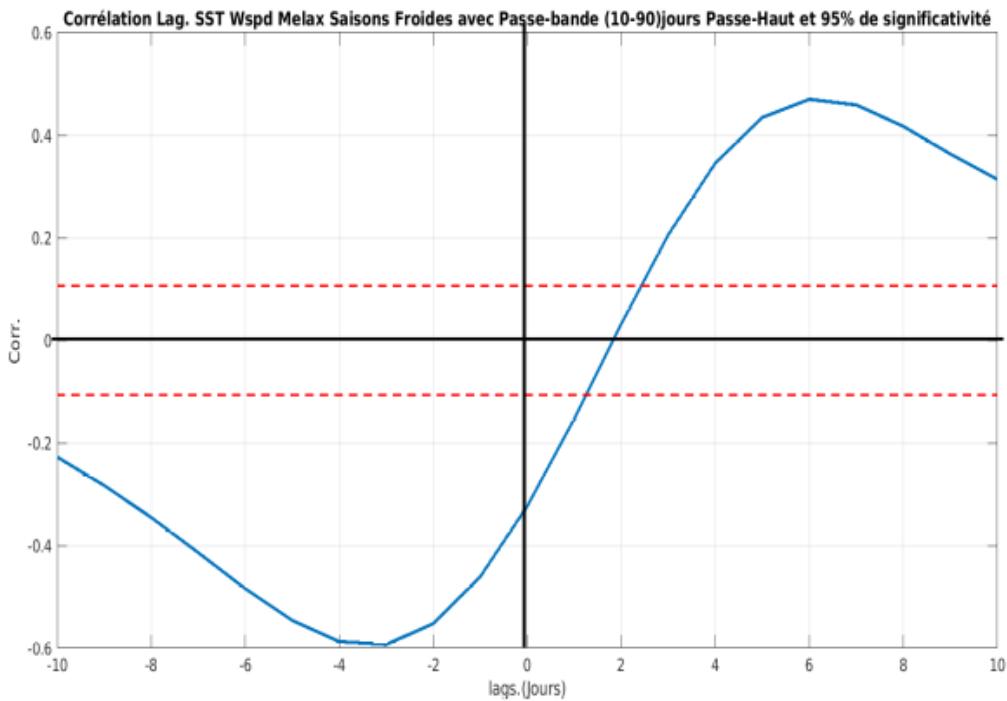


Figure 3.10: Diagramme de corrélation déphasée entre la SST et le Vent au Point Melax avec un Filtre Passe-bande (10-90)Jours et un seuil de significativité de 95%.

incohérence concernant les délais de réponse des deux systèmes. En effet, en se basant sur le lag 0 (décalage nul), on constate que le temps de réponse de l'océan (lag négatif) semble plus court que celui de l'atmosphère (lag positif).

Cela va à l'encontre des dynamiques typiquement observées, où l'atmosphère, en raison de sa moindre inertie thermique et de sa plus grande réactivité aux perturbations, réagit généralement plus rapidement aux variations de l'océan. L'océan, en raison de sa capacité thermique élevée et de sa dynamique plus lente, tend à répondre sur des échelles de temps plus longues. Ce décalage abnormal observé dans le diagramme pourrait s'expliquer par une limitation de la longueur des données utilisées, ou encore par des phénomènes spécifiques à la région d'étude, comme des événements transitoires ou des processus de petite échelle (Chelton et al., 2001). Une autre explication possible serait la présence d'interactions complexes non linéaires entre l'océan et l'atmosphère qui pourraient influencer ces délais de réponse et nécessiteraient une analyse plus approfondie pour être entièrement comprises.

Ces résultats suggèrent qu'une investigation supplémentaire est nécessaire pour affiner notre compréhension des mécanismes de rétroaction dans cette région, notamment en tenant compte de l'effet de la variabilité intra-saisonnière et des facteurs locaux comme les upwellings côtiers, qui jouent un rôle crucial dans la modulation des réponses océan-atmosphère (Small et al., 2008).

Nous avons décomposé la SST et le vent melax en deux saisons, une saison froide

allant de Novembre en Mai et une saison chaude de Juin à Octobre, pour pouvoir analyser séparément les rétroactions selon les saisons.

Une analyse en Ondelette appliquée à chacune de ces saisons a permis d'obtenir la figure 3.11 suivantes pour l'anomalie de la SST.

L'analyse de la figure met en évidence une variabilité intra-saisonnier de la SST net-

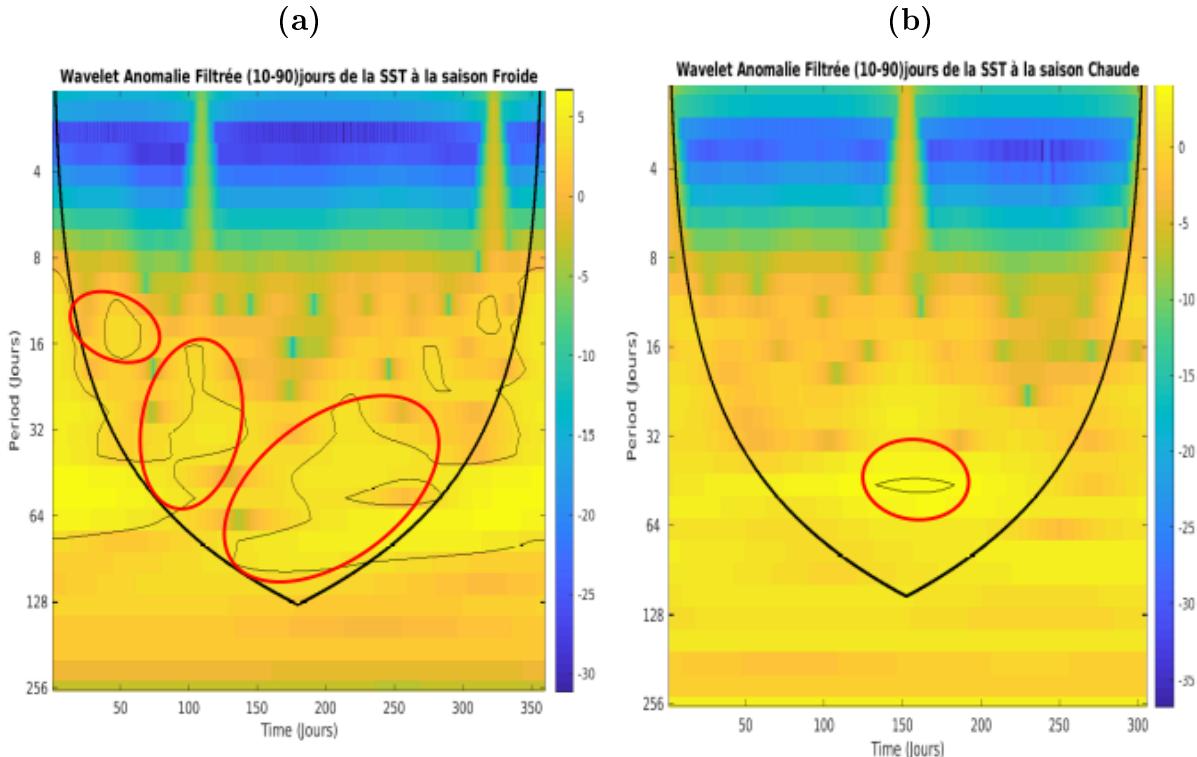


Figure 3.11: Analyse en ondelettes de la SST pendant les saisons froides (a) et chaudes (b) avec un seuil de significativité de 95%.

tement plus marquée pendant la période de refroidissement (a) que pendant la période de réchauffement (b). Cette différence suggère que durant la période froide, les interactions entre l'océan et l'atmosphère sont plus dynamiques, ce qui pourrait résulter de phénomènes tels que des vents plus forts ou des courants océaniques plus intenses.

Cette observation nous a conduit à concentrer la suite de notre étude sur la période froide, car elle présente un cadre plus favorable pour analyser les rétroactions entre la SST et le vent. En se focalisant sur cette période, nous espérons mieux capter et comprendre les mécanismes de rétroaction de la SST sur l'atmosphère, qui semblent plus prononcés dans ces conditions.

### 3.3.2 Analyse des forçages de la SST cas par cas

#### 3.3.2.1 Identification des événements Potentiels de forçage de la SST par le Vent

Dans cette section, nous avons représenté une figure (Figure 3.12) montrant la superposition des séries de SST et de vent au point Melax durant la période de refroidissement (novembre à mai). Les valeurs utilisées ont d'abord été filtrées pour isoler la variabilité intra-saisonnière (entre 10 et 90 jours), puis les anomalies ont été calculées avant de sélectionner les périodes froides spécifiques.

L'objectif de cette analyse est d'identifier les événements où les pics de SST (courbe en noir) précèdent les pics de vent (courbe en magenta) avec des valeurs de même signe, ou simplement d'identifier des événements de rétroaction de la SST sur le vent. Afin de mieux isoler ces événements, nous avons fixé un seuil d'anomalie de la SST à plus ou moins 1°C. Les cercles rouges sur la figure désignent les pics d'anomalie positive de la SST qui précèdent les pics de vent, tandis que les cercles bleus représentent les pics d'anomalie négative.

Sur l'axe des abscisses, les jours correspondant à ces événements sont clairement indiqués : pour les pics positifs de SST, les indices de jours sont 50 et 346, correspondant respectivement au 1er avril 2016 et au 23 novembre 2016. Quant aux pics négatifs, les indices de jours associés sont 140 et 320, représentant le 30 novembre 2015 et le 28 mai 2016. Ces événements marquent les moments clés où la SST semble avoir un impact direct sur la dynamique du vent.

Également sur la figure 3.12b, on a représentée les données de la SST et de vent en utilisant cette fois-ci les données de réanalyses ERA, cependant, on peut voir que l'on retrouve certaines pics qui ont déjà été obtenus avec les données de Melax même si elles ne sont pas tous captés par ERA.

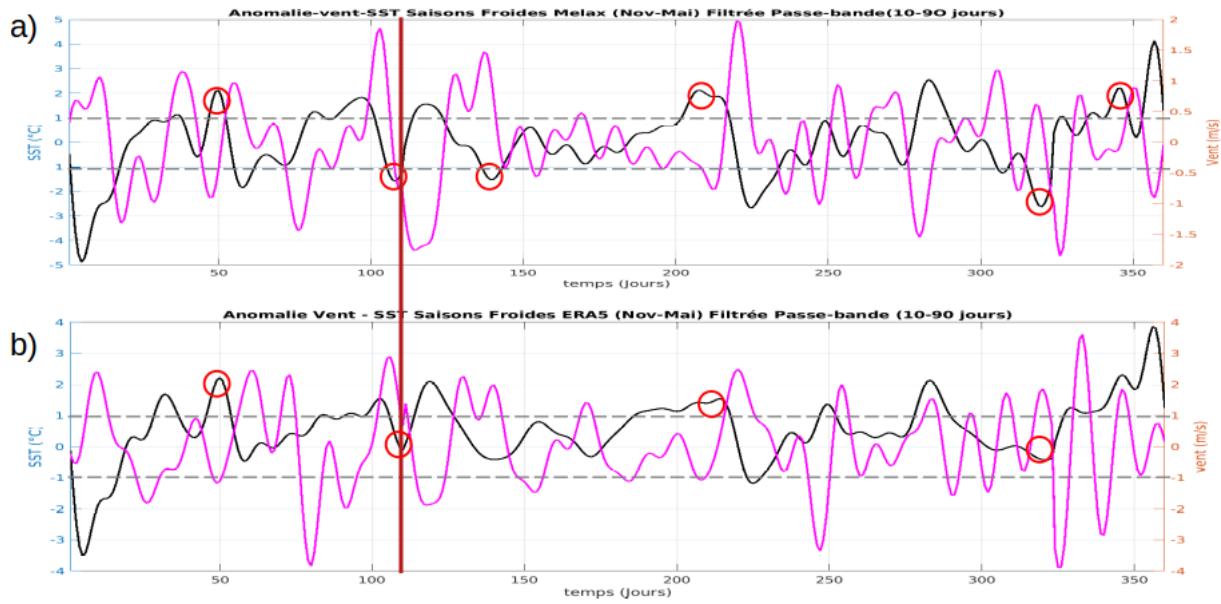


Figure 3.12: Figure montrant en (a) la superposition des séries temporelles des anomalies entre SST (noir) et vent au point Melax (magenta) et en (b) la superposition de la SST et le Vent avec les données ERA au point Melax.

### 3.3.3 Analyses Spatiale des événements de Forçages

Après avoir identifié les événements clés, nous avons procédé à une représentation spatiale de ces événements à l'aide des produits de réanalyse ERA5 pour le vent et la SST. Nous avons extrait les dates correspondant aux indices des pics d'anomalies identifiés avec les données de la bouée Melax sur la période d'étude, en se concentrant spécifiquement sur la côte sénégalaise. La zone autour de la position de la bouée Melax, marquée par un point magenta sur les cartes, a été mise en évidence pour cette analyse.

Ensuite, nous avons calculé les anomalies de vent et de SST pour ces dates après avoir appliqué un filtre passe-bande (10-90 jours). Ce filtrage nous a permis de capturer la même échelle intra-saisonnière que celle observée dans les données de Melax. Cette méthode assure que les événements identifiés localement à partir des observations de la bouée sont cohérents avec les structures régionales des anomalies fournies par ERA5.

L'objectif de cette analyse bidimensionnelle est de visualiser les schémas spatiaux des anomalies de SST et de vent, afin d'évaluer si les pics observés dans les anomalies de vent résultent de la rétroaction de la SST, notamment lorsque les variations de SST précèdent celles du vent. Cette démarche permet également de vérifier si les anomalies détectées autour de la bouée Melax reflètent des phénomènes plus étendus le long de la côte sénégalaise, tels que les fronts thermiques ou les événements d'upwelling, qui jouent un rôle clé dans les interactions océan-atmosphère dans cette région.

### 3.3.4 Représentation des anomalies de pics Positifs

Premier pic Positif : 1 Avril 2015

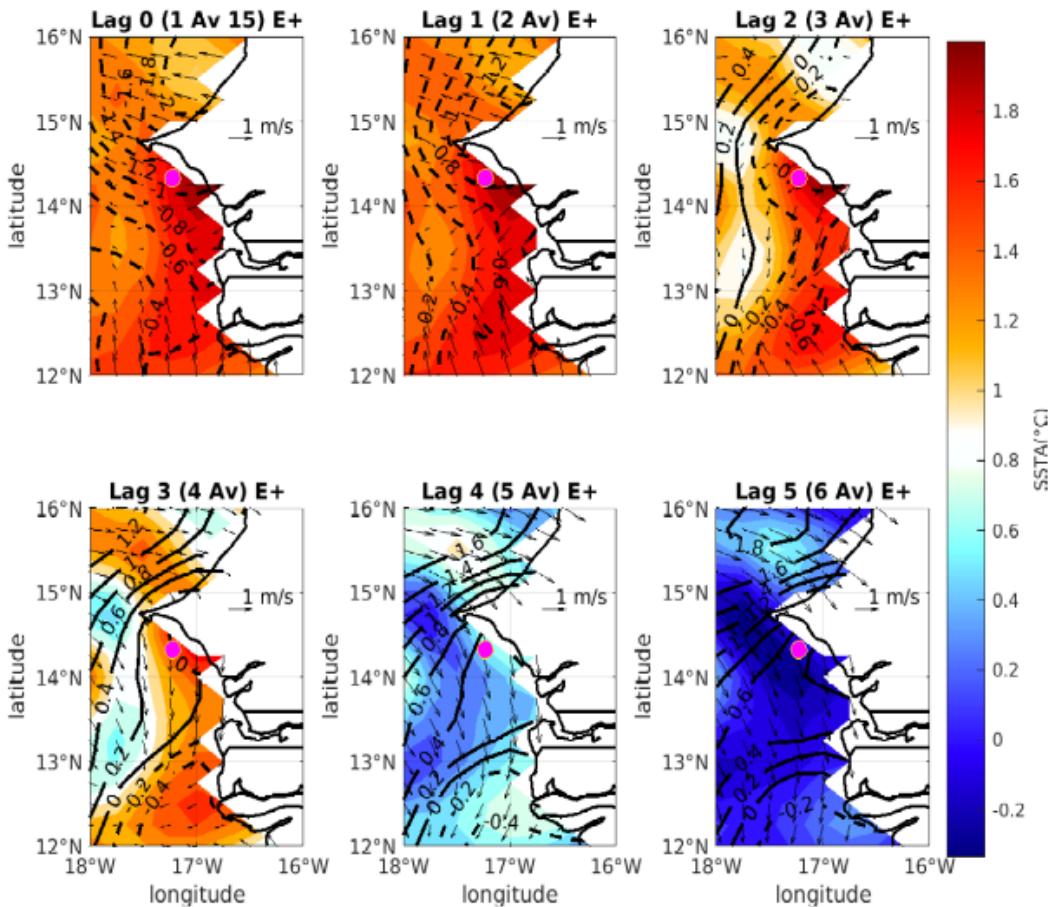


Figure 3.13: Carte spatiale de l'événement positif de pic de SST observé le 1 Avril 2015 : la SSTA est représentée en couleur, l'anomalie de vitesse de vent en contour pointillé pour les anomalies négatives et en contour plein pour les anomalies positives.

L'analyse de ces figures révèle qu'au lag 0, le signal côtier d'anomalies positives est plus marqué sur la Petite Côte (au niveau de Melax) que dans la partie nord de Dakar. Initialement, les anomalies de vitesse du vent (représentées par les contours noirs) sont relativement faibles. Quelques jours plus tard, après le pic d'anomalies de SST (SSTA), on observe, à partir du lag 2, une accélération des vitesses de vent accompagnée de l'apparition d'anomalies positives, plus marquées au lag 3. Cette augmentation de la vitesse du vent se propage de la côte vers le large.

Cette analyse spatiale montre que le pic de vent observé n'est pas dû à une rétroaction de la SST. D'après le mécanisme d'ajustement vertical de Sweet (Sweet et al., 1981), la vitesse du vent issue d'une rétroaction de la SST devrait s'accélérer au-dessus des eaux chaudes, ce qui impliquerait une augmentation plus importante au-dessus du signal

observé, c'est-à-dire une intensification vers la côte.

### Deuxième pic Positif : 23 Nov 2016

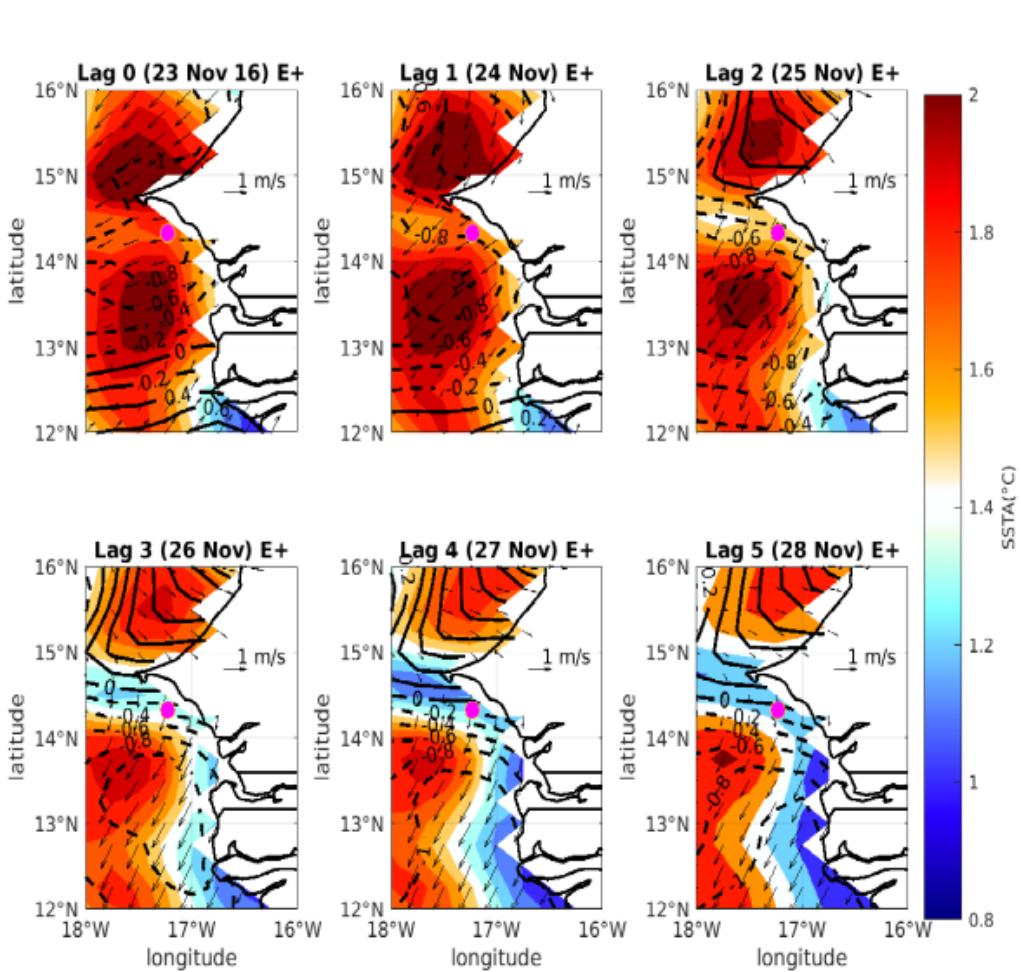


Figure 3.14: Carte spatiale de l'événement positif de pic de SST observé le 23 Nov 2016 : la SSTA est représentée en couleur, l'anomalie de vitesse de vent en contour pointillé pour les anomalies négatives et en contour plein pour les anomalies positives.

L'analyse spatiale de cette figure, qui correspond au deuxième pic de la SST, révèle qu'au lag 0, un signal positif de SSTA est présent à grande échelle de part et d'autre de la presqu'île du Cap-Vert, avec des valeurs maximales enregistrées. Cependant, à partir du lag 2, une accélération des vents est observée au-dessus du signal de SSTA initialement détecté au lag 0, principalement dans la partie nord de la presqu'île. Ce comportement suggère une rétroaction de la SST sur le vent, entraînant une accélération des vents, conformément au mécanisme d'ajustement vertical de Sweet (Sweet et al., 1981).

Toutefois, le pic de vent observé sur la position de la bouée (située au sud) ne semble

pas être expliqué par une rétroaction de la SST. En effet, on y observe un ralentissement des vents au-dessus des anomalies de SST présentes dans cette région, ce qui contredit le mécanisme de rétroaction classique.

### Premier pic Négatif : 30 Nov 2015

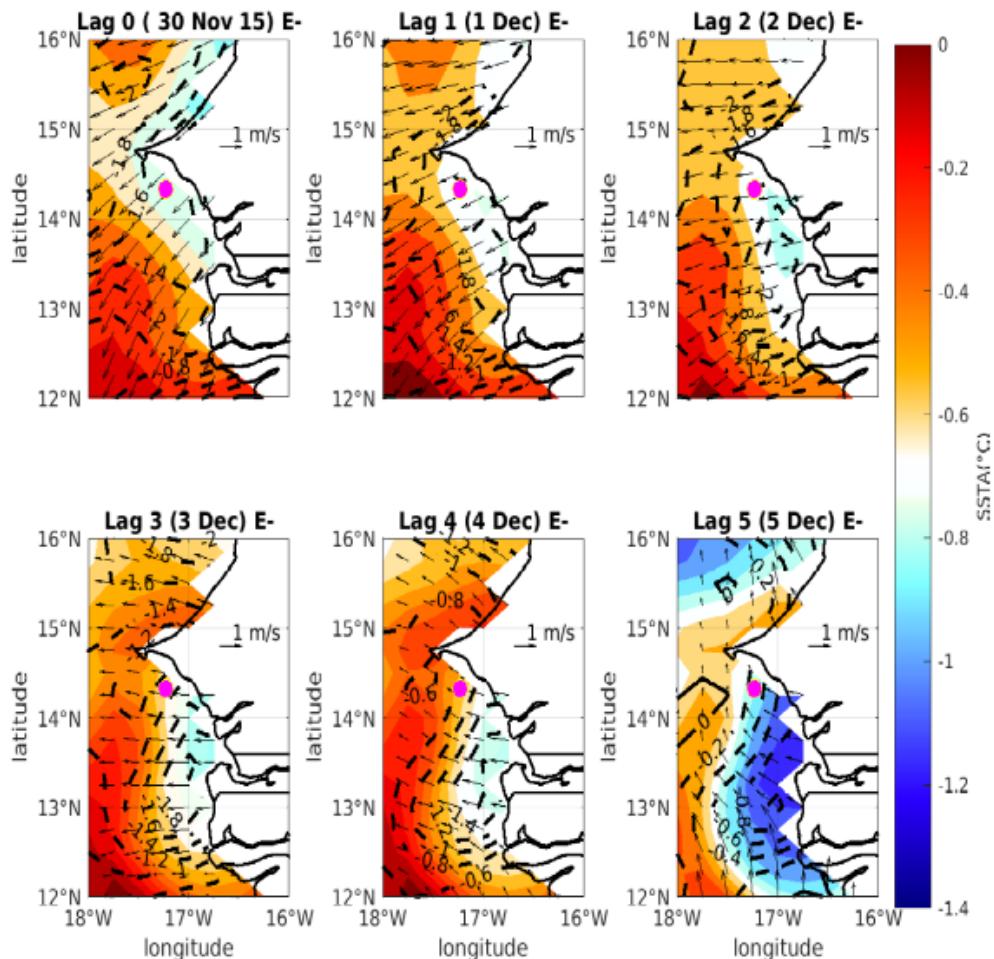


Figure 3.15: Carte spatiale de l'événement négatif de pic de SST observé le 30 Nov 2015 : la SSTA est représentée en couleur, l'anomalie de vitesse de vent en contour pointillé pour les anomalies négatives.

L'analyse spatiale de la figure 3.15 montre qu'au lag 0, correspondant au premier pic négatif d'anomalies de SST, un signal négatif de SSTA s'étend à grande échelle tout au long de la côte, notamment au niveau de la position de Melax. Quelques jours plus tard, à partir du lag 3, on observe un ralentissement progressif de la vitesse des vents, se propageant du large vers la côte, en corrélation avec le signal de SSTA froide.

Ce ralentissement est particulièrement prononcé au-dessus des zones où les anomalies de SST sont négatives. Ce processus est cohérent avec le mécanisme décrit par Sweet, selon lequel les eaux froides augmentent la stabilité de la couche limite atmosphérique, ce qui entraîne une réduction des vitesses du vent au-dessus de ces zones. Par conséquent, le pic de vent observé dans cette région peut être interprété comme une rétroaction claire de la SST sur l'atmosphère.

### Deuxième pic Négatif : 28 Mai 2016

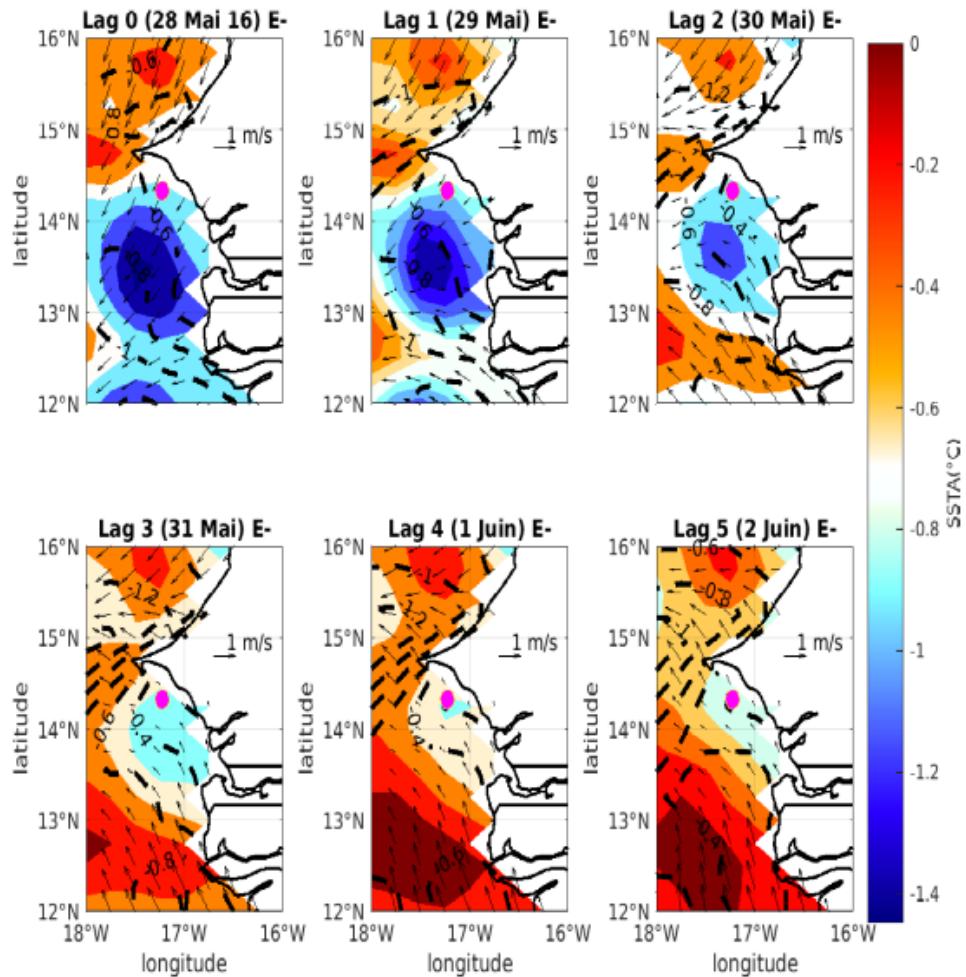


Figure 3.16: Carte spatiale de l'événement négatif de pic de SST observé le 28 Mai 2016 : la SSTA est représentée en couleur, l'anomalie de vitesse de vent en contour pointillé pour les anomalies négatives.

L'analyse spatiale de la figure 3.16, correspondant au dernier pic négatif de la SSTA, montre qu'au lag 0, un signal côtier local négatif de SSTA est observé, principalement sur

## CHAPITRE 3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

---

la partie sud de Dakar, où se situe la bouée Melax. Quelques jours plus tard, à partir du lag 1, on note un ralentissement de la vitesse du vent se propageant de la côte vers le large. Ce comportement est inverse à ce qui serait attendu si le vent répondait directement à la SSTA côtière, car le ralentissement devrait plutôt se propager du large vers la côte.

En résumé, l'analyse spatiale des différents pics de vent, précédés de pics de SST de même signe, observés dans la série temporelle au point de Melax, avec un filtrage à l'échelle intrasaisonnière, révèle que ces pics ne sont pas, pour la plupart, issus de la rétroaction de la SST sur le vent. Bien que des changements dans la direction des vents soient observés pour des lags supérieurs à 0, l'intensité des vents (représentée par les contours noirs) n'obéit pas au mécanisme d'ajustement vertical décrit par Sweet et al. (1981). Selon ce mécanisme, une SSTA positive devrait localement accélérer les vents au-dessus, tandis qu'une SSTA négative devrait localement les ralentir. Par conséquent, ces pics de vent semblent être liés à des phénomènes locaux indépendants de la rétroaction de la SST.

Cependant, deux exceptions ont été notées :

1. 30 novembre 2015 : Le pic négatif de SSTA correspond bien au mécanisme de Sweet, avec un ralentissement des vents au-dessus des eaux froides.
2. 23 novembre 2016 : Un pic positif de SSTA montre une rétroaction sur les vents, mais celle-ci est limitée à une partie du signal de SST observé au lag 0, principalement dans la partie nord.

Ces cas isolés mettent en lumière des conditions spécifiques qui peuvent parfois favoriser une interaction directe entre la SST et la dynamique des vents. Cela souligne également la complexité des mécanismes sous-jacents et la nécessité de mieux comprendre les interactions multifactorielles dans ces environnements côtiers.

En outre, l'étude révèle l'importance d'une approche multi-échelle et pluridisciplinaire pour mieux cerner les rétroactions océan-atmosphère. L'ajout de données in-situ supplémentaires, couplées à des modèles numériques à haute résolution, pourrait permettre de capturer les processus locaux et régionaux qui influencent ces interactions.

De plus, les analyses futures pourraient s'orienter vers une exploration détaillée des mécanismes à haute fréquence temporelle, ainsi qu'une étude plus approfondie des gradients horizontaux et verticaux de la SST. Ces gradients sont susceptibles de jouer un rôle important dans la modulation des vents locaux, notamment à travers des processus tels que les ondes de gravité ou les fronts thermiques côtiers.

Ainsi, cette étude ne se limite pas à mettre en lumière les lacunes du modèle classique de rétroaction SST-vent, mais ouvre également des perspectives prometteuses pour une compréhension approfondie des interactions océan-atmosphère dans des contextes géographiques variés.

---

**CHAPITRE**

**4**

# Conclusion et Perspectives

## Sommaire

---

4.1 Conclusion . . . . .	48
4.2 Perspectives . . . . .	49

---

## 4.1 Conclusion

Cette étude a permis d'approfondir notre compréhension des interactions complexes entre l'océan et l'atmosphère, en particulier dans la région côtière sénégalaise, où les processus dynamiques sont influencés par des facteurs locaux et régionaux spécifiques. En s'appuyant sur des données in-situ issues de la bouée Melax et filtrées à l'échelle intrasaisonnière, nous avons analysé les mécanismes de rétroaction SST-vent sous l'angle de leur manifestation locale et spatiale.

Les résultats obtenus montrent que, dans la majorité des cas, les variations de la SSTA ne s'accompagnent pas de réponses directes des vents conformes au mécanisme classique de Sweet et al. (1981). Bien que ce mécanisme prévoie une accélération des vents au-dessus des anomalies positives de SST et un ralentissement au-dessus des anomalies négatives, ces phénomènes ne se manifestent que rarement dans les observations analysées. L'intensité des vents ne semble pas systématiquement influencée par la SST, bien que des décalages

temporels aient révélé des changements de direction du vent. Ces observations suggèrent que d'autres processus locaux ou régionaux, indépendants de la rétroaction SST-vent, jouent un rôle significatif dans la dynamique atmosphérique de cette zone.

Cependant, deux événements spécifiques, en novembre 2015 et novembre 2016, ont permis de documenter des rétroactions conformes aux hypothèses classiques, bien que limitées dans leur portée spatiale et temporelle. Ces exceptions mettent en lumière la diversité des mécanismes en jeu et montrent que, sous certaines conditions, la SST peut effectivement moduler la dynamique des vents locaux. Ces cas isolés, bien qu'ils confirment l'existence de rétroactions SST-vent, soulignent également leur caractère sporadique et contextuel.

En conclusion, cette étude démontre que la rétroaction de l'océan sur l'atmosphère dans la région côtière sénégalaise est influencée par une combinaison complexe de facteurs, parmi lesquels les processus locaux liés à la bathymétrie, la configuration côtière, et les dynamiques océaniques régionales. Si les mécanismes classiques offrent une base théorique solide pour interpréter certaines interactions, ils ne suffisent pas à expliquer la variabilité observée dans cette région spécifique. Cette diversité des mécanismes appelle à une approche plus intégrée, combinant données in-situ, observations satellitaires et modélisation, pour mieux appréhender les interactions océan-atmosphère à l'échelle locale.

## 4.2 Perspectives

Les résultats obtenus ouvrent plusieurs pistes de recherche intéressantes pour approfondir notre compréhension des interactions océan-atmosphère dans la région côtière du Sénégal, mais aussi pour élargir l'analyse à d'autres contextes géographiques et temporels. Voici quelques perspectives pour de futures études :

1. **Analyse à haute résolution temporelle** : L'étude des événements à haute fréquence pourrait être encore plus détaillée en appliquant des filtres à différentes échelles temporelles. Une investigation plus poussée de la variabilité à des échelles inférieures à 10 jours pourrait permettre d'identifier des mécanismes de rétroaction plus complexes, qui échappent aux analyses actuelles. De plus, des approches basées sur des modèles de prévision à haute fréquence pourraient offrir une meilleure modélisation des interactions à ces échelles.
2. **Études régionales et observations in-situ** : Pour approfondir l'étude de la rétroaction SST-vent, une approche davantage spatialisée pourrait être envisagée en intégrant des données provenant de plusieurs bouées ou stations côtières. Cela inclurait non seulement la zone de Melax, mais également d'autres régions côtières

du Sénégal, notamment la Grande-Côte au nord. Cette région, caractérisée par une bathymétrie distincte en raison de la presqu'île du Cap-Vert, a montré des signes de rétroaction notable dans l'analyse spatiale.

Une telle démarche permettrait de mieux comprendre les variations spatiales des rétroactions et les mécanismes locaux de transport de chaleur et d'humidité. En particulier, des observations in-situ de la SST et des paramètres atmosphériques à différentes profondeurs, combinées à des mesures de vent et de pression atmosphérique, seraient indispensables pour décrypter les interactions complexes dans ces zones côtières.

3. **Modélisation de la rétroaction océan-atmosphère :** L'intégration de modèles numériques à haute résolution spatiale et temporelle serait un moyen efficace d'élargir la compréhension des mécanismes locaux. Ces modèles pourraient inclure des paramètres supplémentaires tels que la profondeur de la thermocline ou les courants côtiers, qui jouent un rôle dans la variabilité locale de la SST et peuvent influencer la dynamique atmosphérique. L'utilisation de modèles couplés océan-atmosphère de haute résolution permettrait d'améliorer les prévisions climatiques à l'échelle régionale, notamment pour les phénomènes extrêmes comme les tempêtes côtières ou les changements soudains de la température.
4. **Utilisation combinée des données in-situ et satellitaires :** Afin de surmonter les limites des données satellitaires dans les zones côtières, une approche combinée, associant données in-situ et observations satellitaires à haute résolution, permettrait de réduire les biais observés dans les prédictions climatiques. Cette approche hybride pourrait renforcer la précision des analyses de la SST et de la dynamique atmosphérique, particulièrement dans les zones à forte variabilité spatio-temporelle comme celles proches des côtes.

En somme, cette étude ouvre des perspectives pour mieux comprendre et modéliser les interactions océan-atmosphère dans les zones côtières sénégalaises, avec des implications importantes pour la gestion des risques climatiques et la prévision des événements météorologiques extrêmes dans ces régions vulnérables. Une telle approche multimodale, combinant observations in-situ, données satellitaires et modélisation à haute résolution, pourrait contribuer à la mise en place de stratégies de gestion plus efficaces face aux défis climatiques de demain.

Par ailleurs, une limitation importante réside dans la durée des séries temporelles disponibles. Plus la série de données est longue, plus les résultats obtenus seront robustes. Ainsi, l'extension de la série temporelle de la bouée Melax en utilisant des outils

## CHAPITRE 4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

---

de prévision comme l'outil KNN pour combler les données manquantes permettrait de renforcer la continuité des analyses. Cela offrirait une meilleure couverture temporelle et permettrait d'approfondir, conduisant à des résultats plus fiables et une meilleure compréhension des interactions entre l'océan et l'atmosphère.

## Références

- Altman, N.S., 1992. An Introduction to Kernel and Nearest-Neighbor Non-parametric Regression. *The American Statistician* 46, 175–185. <https://doi.org/10.1080/00031305.1992.10475879>
- Bakun, A., 1990. Global Climate Change and Intensification of Coastal Ocean Upwelling. *Science* 247, 198–201. <https://doi.org/10.1126/science.247.4939.198>
- Bjerknes, J., 1969. ATMOSPHERIC TELECONNECTIONS FROM THE EQUATORIAL PACIFIC. *Monthly Weather Review* 97, 163–172. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1969\)097<0163:ATFTEP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1969)097<0163:ATFTEP>2.3.CO;2)
- Blackmon, M.L., 1976. A climatological spectral study of the 500 mb geopotential height of the Northern Hemisphere. *Journal of Atmospheric Sciences* 33, 1607–1623.
- Brink, K.H., 1983. The near-surface dynamics of coastal upwelling. *Progress in Oceanography* 12, 223–257.
- Chelton, D.B., Esbensen, S.K., Schlax, M.G., Thum, N., Freilich, M.H., Wentz, F.J., Gentemann, C.L., McPhaden, M.J., Schopf, P.S., 2001. Observations of coupling between surface wind stress and sea surface temperature in the eastern tropical Pacific. *Journal of Climate* 14, 1479–1498.
- Chelton, D.B., Schlax, M.G., Freilich, M.H., Milliff, R.F., 2004. Satellite Measurements Reveal Persistent Small-Scale Features in Ocean Winds. *Science* 303, 978–983. <https://doi.org/10.1126/science.1091901>
- Chelton, D.B., Schlax, M.G., Samelson, R.M., De Szoeke, R.A., 2007. Global observations of large oceanic eddies. *Geophysical Research Letters* 34, 2007GL030812. <https://doi.org/10.1029/2007GL030812>
- Chelton, D.B., Xie, S.-P., 2010. Coupled Ocean-Atmosphere Interaction at Oceanic Mesoscales. *Oceanography* 23, 52–69.
- Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Quéré, C.L., Myenni, R., Piao, S., Thornton, P., Archer, D., Arora, V., Bonan, G., Borges, A.V.,

Bousquet, P., Bouwman, L., Caldeira, K., Cao, L., Chappellaz, J., Chevallier, F., Cleveland, C., Cox, P., Dentener, F.J., Erisman, J.W., Gruber, N., Gurney, K., Hopwood, B., House, J.I., Houweling, S., Hurt, G., Jacobson, A.D., Jain, A., Joos, F., Kaplan, J.O., Kato, E., Keeling, R., Khatiwala, S., Kirschke, S., Goldewijk, K.K., Kloster, S., Koven, C., Kroeze, C., Lamarque, F., Lassey, K., Lomas, M.R., Luo, Y., Maki, T., Marland, G., Matthews, H.D., Mayorga, E., Melton, J.R., Metzl, N., Munhoven, G., Niwa, Y., Norby, R.J., O'Connor, F., Orr, J., Park, G.-H., Patra, P., Peregon, A., Peters, W., Poulter, B., Raymond, P.A., Rayner, P., Ringeval, B., Schmittner, A., Schuur, E., Sitch, S., Stocker, B., Takahashi, T., Thompson, R.L., van Vuuren, Zeng, N., 2013. Chapter 6: Carbon and Other Biogeochemical Cycles.

Cover, T., Hart, P., 1967. Nearest neighbor pattern classification. IEEE transactions on information theory 13, 21–27.

Diakhaté, M., de Coëtlogon, G., Lazar, A., Wade, M., Gaye, A.T., 2016. Intraseasonal variability of tropical Atlantic sea-surface temperature: air-sea interaction over upwelling fronts. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 142, 372–386. <https://doi.org/10.1002/qj.2657>

Diakhaté, M., Lazar, A., de Coëtlogon, G., Gaye, A.T., 2018. Do SST gradients drive the monthly climatological surface wind convergence over the tropical Atlantic? International Journal of Climatology 38, e955–e965. <https://doi.org/10.1002/joc.5422>

Diedhiou, A., Bichet, A., Wartenburger, R., Seneviratne, S.I., Rowell, D.P., Sylla, M.B., Diallo, I., Todzo, S., Touré, N.E., Camara, M., Ngatchah, B.N., Kane, N.A., Tall, L., Affholder, F., 2018. Changes in climate extremes over West and Central Africa at 1.5 °C and 2 °C global warming. Environ. Res. Lett. 13, 065020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac3e5>

Dieng, A.L., Ndoye, S., Jenkins, G.S., Sall, S.M., Gaye, A.T., 2019. Estimating zonal Ekman transport along coastal Senegal during passage of Hurricane Fred (2015) from August 30 to 31, 2015.

Duchon, C.E., 1979. Lanczos Filtering in One and Two Dimensions. Journal of Applied Meteorology and Climatology 18, 1016–1022. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1979\)018<1016:LFI0AT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1979)018<1016:LFI0AT>2.0.CO;2)

- Ekman, V.W., 1905. On the influence of the earth's rotation on ocean-currents.
- Fairall, C.W., Bradley, E.F., Godfrey, J.S., Wick, G.A., Edson, J.B., Young, G.S., 1996. Cool-skin and warm-layer effects on sea surface temperature. *J. Geophys. Res.* 101, 1295–1308. <https://doi.org/10.1029/95JC03190>
- Graham, N., Barnett, T., 1987. Sea Surface Temperature, Surface Wind Divergence, and Convection over Tropical Oceans | Science [WWW Document]. URL <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.238.4827.657> (accessed 10.23.24).
- Hayes, S.P., McPhaden, M.J., Wallace, J.M., 1989. The Influence of Sea-Surface Temperature on Surface Wind in the Eastern Equatorial Pacific: Weekly to Monthly Variability. *Journal of Climate* 2, 1500–1506. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1989\)002<1500:TIOSST>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1989)002<1500:TIOSST>2.0.CO;2)
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellán, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., De Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quart J Royal Meteorol Soc* 146, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hulme, M., Doherty, R., Ngara, T., New, M., Lister, D., 2001. African climate change: 1900-2100. *Climate research* 17, 145–168.
- Hurrell, J.W., Deser, C., 2010. North Atlantic climate variability: the role of the North Atlantic Oscillation. *Journal of marine systems* 79, 231–244.
- Jenkins, G.S., Brito, E., Soares, E., Chiao, S., Lima, J.P., Tavares, B., Cardoso, A., Evora, F., Monteiro, M., 2017. Hurricane Fred (2015): Cape Verde's First Hurricane in Modern Times: Observations, Impacts, and Lessons Learned. *Bulletin of the American Meteorological Society* 98, 2603–2618. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0222.1>
- Kuhlbrodt, T., Griesel, A., Montoya, M., Levermann, A., Hofmann, M., Rahmstorf, S., 2007. On the driving processes of the Atlantic meridional overturning

- circulation. *Reviews of Geophysics* 45. <https://doi.org/10.1029/2004RG000166>
- Lélé, M.I., Leslie, L.M., Lamb, P.J., 2015. Analysis of Low-Level Atmospheric Moisture Transport Associated with the West African Monsoon. *Journal of Climate* 28, 4414–4430. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00746.1>
- Levitus, S., Antonov, J.I., Boyer, T.P., Baranova, O.K., Garcia, H.E., Locarnini, R.A., Mishonov, A.V., Reagan, J.R., Seidov, D., Yarosh, E.S., Zweng, M.M., 2012. World ocean heat content and thermosteric sea level change (0–2000 m), 1955–2010. *Geophysical Research Letters* 39, 2012GL051106. <https://doi.org/10.1029/2012GL051106>
- Lindzen, R.S., Nigam, S., 1987. On the Role of Sea Surface Temperature Gradients in Forcing Low-Level Winds and Convergence in the Tropics. *Journal of the Atmospheric Sciences* 44, 2418–2436. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1987\)044<2418:OTROSS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1987)044<2418:OTROSS>2.0.CO;2)
- Marshall, J., Plumb, A., 2007. Circulation of the Atmosphere and Ocean: an introductory text. Massachusetts Institute of Technology.
- McClain, C.R., Christian, J.R., Signorini, S.R., Lewis, M.R., Asanuma, I., Turk, D., Dupouy-Douchement, C., 2002. Satellite ocean-color observations of the tropical Pacific Ocean. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 49, 2533–2560.
- McGregor, S., Timmermann, A., 2011. The effect of explosive tropical volcanism on ENSO. *Journal of climate* 24, 2178–2191.
- McGregor, S., Timmermann, A., Schneider, N., Stuecker, M.F., England, M.H., 2012. The effect of the South Pacific convergence zone on the termination of El Niño events and the meridional asymmetry of ENSO. *Journal of Climate* 25, 5566–5586.
- Mittelstaedt, E., 1991. The ocean boundary along the northwest African coast: Circulation and oceanographic properties at the sea surface. *Progress in Oceanography* 26, 307–355.
- Nakken, M., 1999. Wavelet analysis of rainfall/runoff variability isolating climatic from anthropogenic patterns. *Environmental Modelling Software* 14, 283–295. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00080-2](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00080-2)

Ndoye, S., 2016. Fonctionnement dynamique du centre d'upwelling sud-sénégalais: approche par la modélisation réaliste et l'analyse d'observations satellite de température de surface de la mer (PhD Thesis). Université Pierre et Marie Curie-Paris VI; Université Cheikh Anta Diop (Dakar).

Neukermans, G., Harmel, T., Galí Tàpias, M., Rudorff, N., Chowdhary, J., Dubovik, O., Hostetler, C., Hu, Y., Jamet, C., Knobelispiesse, K., Yoav, L., Litvinov, P., Sayer, A., Ward, B., Boss, E., Koren, I., Miller, L., Deming, J., Arrigo, K. (2018). Harnessing remote sensing to address critical science questions on ocean-atmosphere interactions. *Elem Sci Anth*, 6. <https://doi.org/10.1525/elementa.331>

Nicholson, S.E., Grist, J.P., 2003. The Seasonal Evolution of the Atmospheric Circulation over West Africa and Equatorial Africa. *Journal of Climate* 16, 1013–1030. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<1013:TSEOTA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<1013:TSEOTA>2.0.CO;2)

Oerder, V., 2016. Interactions couplées océan-atmosphère à méso-échelle dans le Pacifique Sud-Est (PhD Thesis). UPMC-Université Paris 6 Pierre et Marie Curie.

Philander, S.G., 1989. El Niño, La Niña, and the southern oscillation. *International geophysics series* 46, X–289.

Rasmusson, E.M., Carpenter, T.H., 1982. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Monthly Weather Review* 110, 354–384.

Reynolds, R.W., Smith, T.M., Liu, C., Chelton, D.B., Casey, K.S., Schlax, M.G., 2007. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *Journal of climate* 20, 5473–5496.

Rhein, M., Rintoul, S.R., Aoki, S., Campos, E., Chambers, D., Feely, R.A., Gulev, S., Johnson, G.C., Josey, S.A., Kostianoy, A., Mauritzen, C., Roemmich, D., Talley, L.D., 2013. Observations: Ocean, in: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), . Cambridge University Press, pp. 255–316.

Sabine, C.L., Feely, R.A., Gruber, N., Key, R.M., Lee, K., Bullister, J.L., Wanninkhof, R., Wong, C.S., Wallace, D.W.R., Tilbrook, B., Millero, F.J., Peng, T.-H., Kozyr, A., Ono, T., Rios, A.F., 2004. The Oceanic Sink for Anthropogenic CO<sub>2</sub>. *Science*

305, 367–371. <https://doi.org/10.1126/science.1097403>

Schmitz, W.J., 1996. On the interbasin-scale thermohaline circulation. Oceanographic Literature Review 1, 7.

Schwing, F.B., Mendelsohn, R., Bograd, S.J., Overland, J.E., Wang, M., Ito, S., 2010. Climate change, teleconnection patterns, and regional processes forcing marine populations in the Pacific. Journal of Marine Systems 79, 245–257.

Schwing, F.B., Murphree, T., Green, P.M., 2002. The Northern Oscillation Index (NOI): a new climate index for the northeast Pacific. Progress in Oceanography, Physical and Biological Conditions and Processes in the Northeast Pacific Ocean 53, 115–139. [https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(02\)00027-7](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(02)00027-7)

Small, R.J., deSzoeke, S.P., Xie, S.P., O'Neill, L., Seo, H., Song, Q., Cornillon, P., Spall, M., Minobe, S., 2008. Air-sea interaction over ocean fronts and eddies. Dynamics of Atmospheres and Oceans, OCEANIC FRONTS 45, 274–319. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2008.01.001>

Small, R.J., Xie, S.-P., Wang, Y., 2003. Numerical simulation of atmospheric response to Pacific tropical instability waves. Journal of Climate 16, 3723–3741.

Sutton, R.T., Hodson, D.L.R., 2005. Atlantic Ocean Forcing of North American and European Summer Climate. Science 309, 115–118. <https://doi.org/10.1126/science.1109496>

Sweet, W., Fett, R., Kerling, J., Violette, P.L., 1981. Air-Sea Interaction Effects in the Lower Troposphere Across the North Wall of the Gulf Stream. Monthly Weather Review 109, 1042–1052. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<1042:ASIEIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<1042:ASIEIT>2.0.CO;2)

Tall, A.W., Machu, E., Echevin, V., Capet, X., Pietri, A., Corréa, K., Sall, S.M., Lazar, A., 2021. Variability of Dissolved Oxygen in the Bottom Layer of the Southern Senegalese Shelf. Journal of Geophysical Research: Oceans 126, e2020JC016854. <https://doi.org/10.1029/2020JC016854>

Thiam, M. Couplage océan-atmosphère en Atlantique Tropical Nord-Est et impact

sur les précipitations au Sénégal.

Thomson, R.E., Emery, W.J., 2014. Data Analysis Methods in Physical Oceanography. Newnes.

Torrence, C., Compo, G.P., 1998. A Practical Guide to Wavelet Analysis. Bulletin of the American Meteorological Society 79, 61–78. [https://doi.org/10.1175/15200477\(1998\)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2)

Trenberth, K.E., Fasullo, J.T., Kiehl, J., 2009. Earth's global energy budget. Bulletin of the american meteorological society 90, 311–324.

Wai, M.M.-K., Stage, S.A., 1989. Dynamical analyses of marine atmospheric boundary layer structure near the Gulf Stream oceanic front. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 115, 29–44. <https://doi.org/10.1002/qj.49711548503>

Waliser, D.E., Graham, N.E., Gautier, C., 1993. Comparison of the Highly Reflective Cloud and Outgoing Longwave Radiation Datasets for Use in Estimating Tropical Deep Convection. Journal of Climate 6, 331–353. [https://doi.org/10.1175/15200442\(1993\)006<0331:COTHRC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200442(1993)006<0331:COTHRC>2.0.CO;2)

Wallace, J.M., Mitchell, T.P., Deser, C., 1989. The Influence of Sea-Surface Temperature on Surface Wind in the Eastern Equatorial Pacific: Seasonal and Interannual Variability. Journal of Climate 2, 1492–1499. [https://doi.org/10.1175/15200442\(1989\)002<1492:TIOSST>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200442(1989)002<1492:TIOSST>2.0.CO;2)

Wane, D., Dieng, A.L., Niang, C., Gaye, A.T., 2023. Northeastern Tropical Atlantic SST and Sahel Rainfall Variability. Atmospheric and Climate Sciences 13, 431–454. <https://doi.org/10.4236/acs.2023.134024>

Wentz, F.J., Gentemann, C., Smith, D., Chelton, D., 2000. Satellite Measurements of Sea Surface Temperature Through Clouds. Science 288, 847–850. <https://doi.org/10.1126/science.288.5467.847>

Wilks, D.S., 2011. Statistical methods in the atmospheric sciences. Academic press.

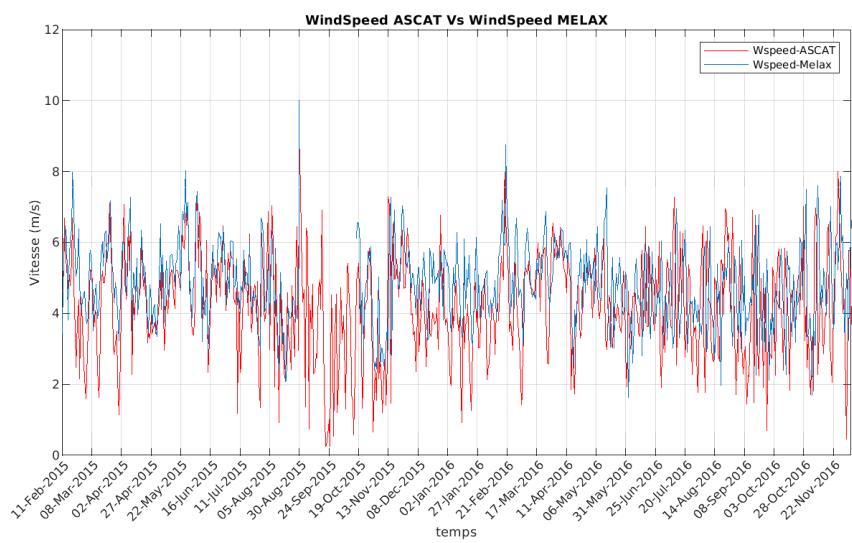
Wooster, W.S., Bakun, A., McLain, D.R., 1976. The seasonal upwelling cycle along the eastern boundary of the North Atlantic.

Xie, S.-P., 2004a. Satellite Observations of Cool Ocean–Atmosphere Interaction. Bulletin of the American Meteorological Society 85, 195–208. <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-2-195>

Xie, S.-P., 2004b. Satellite Observations of Cool Ocean–Atmosphere Interaction. Bulletin of the American Meteorological Society 85, 195–208. <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-2-195>

# Annexes

(a)



(b)

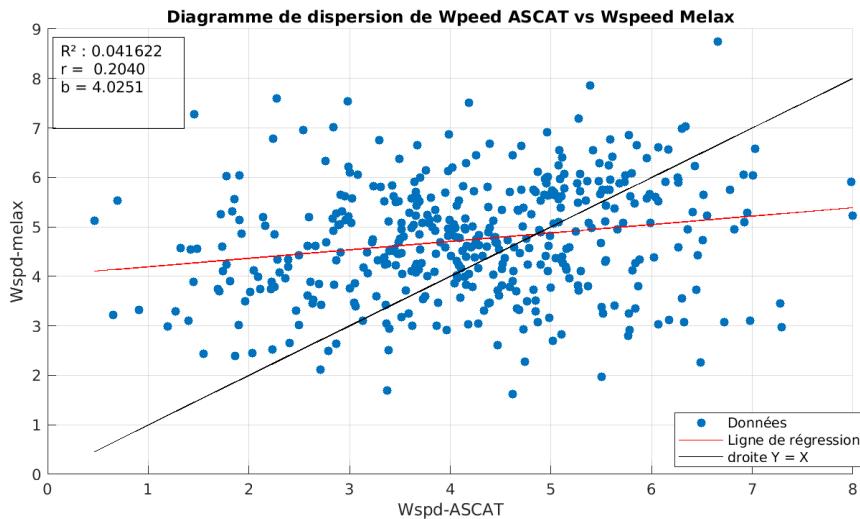
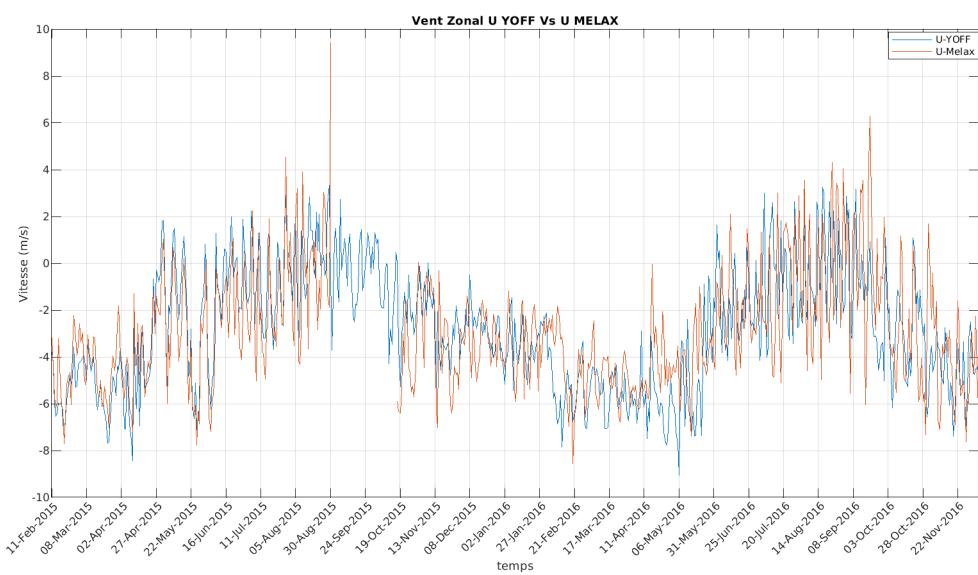


Figure .1: Figure montrant (a): la vitesse du vent Melax en rouge et ASCAT en bleu et (b): diagramme de dispersion entre Melax et ASCAT où la droite la droite de regression linéaire est représentée en rouge et la droite en noir désigne la droite  $Y = X$ .

(a)



(b)

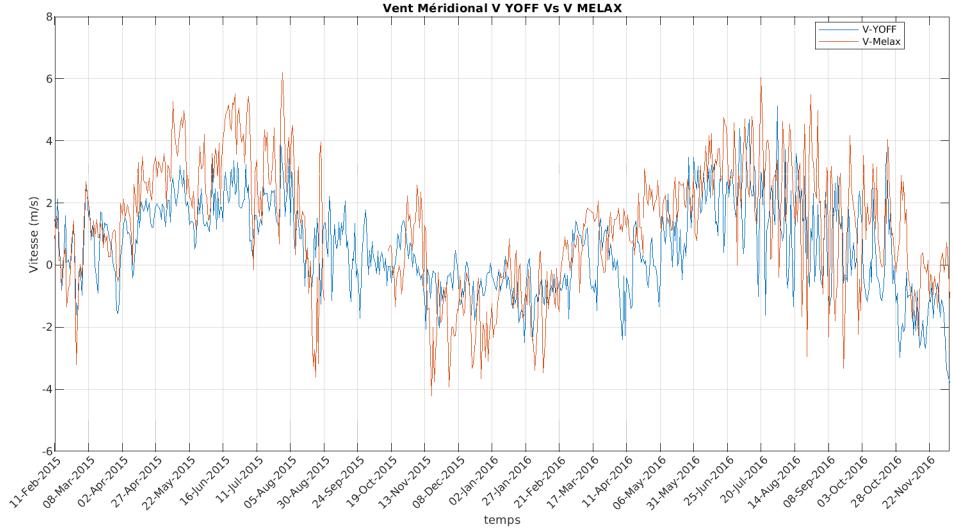


Figure .2: Figure montrant (a): la vitesse du vent zonal Melax (rouge) et YOFF (bleu), (b): la vitesse du vent m茅ridional Melax (rouge) et YOFF (bleu).

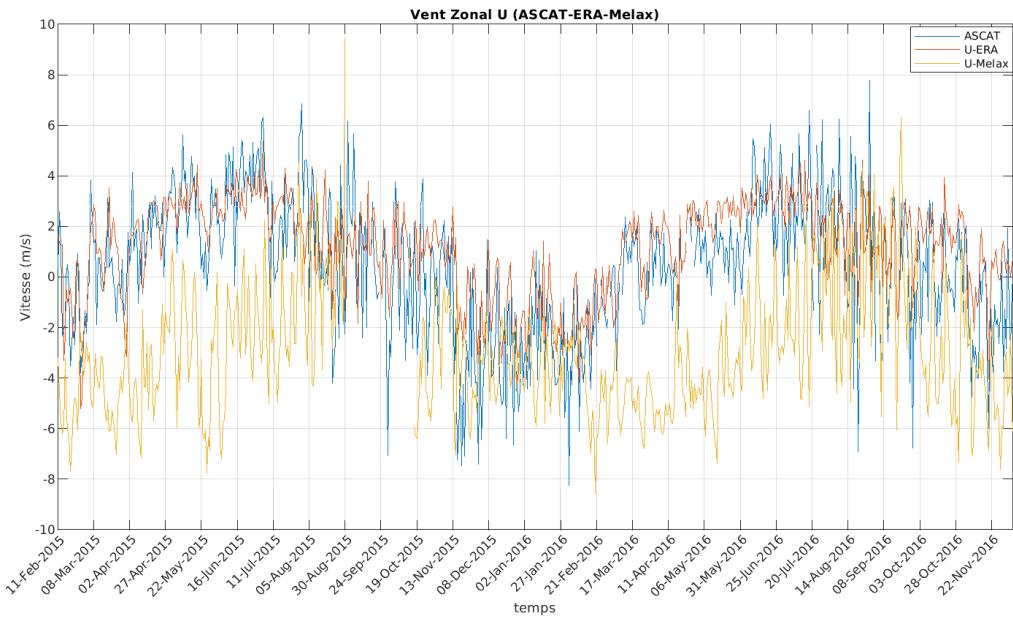


Figure .3: Figure montrant la superposition des vents zonaux de Melax (jaune), ERA (rouge ) et ASCAT ( bleu ).

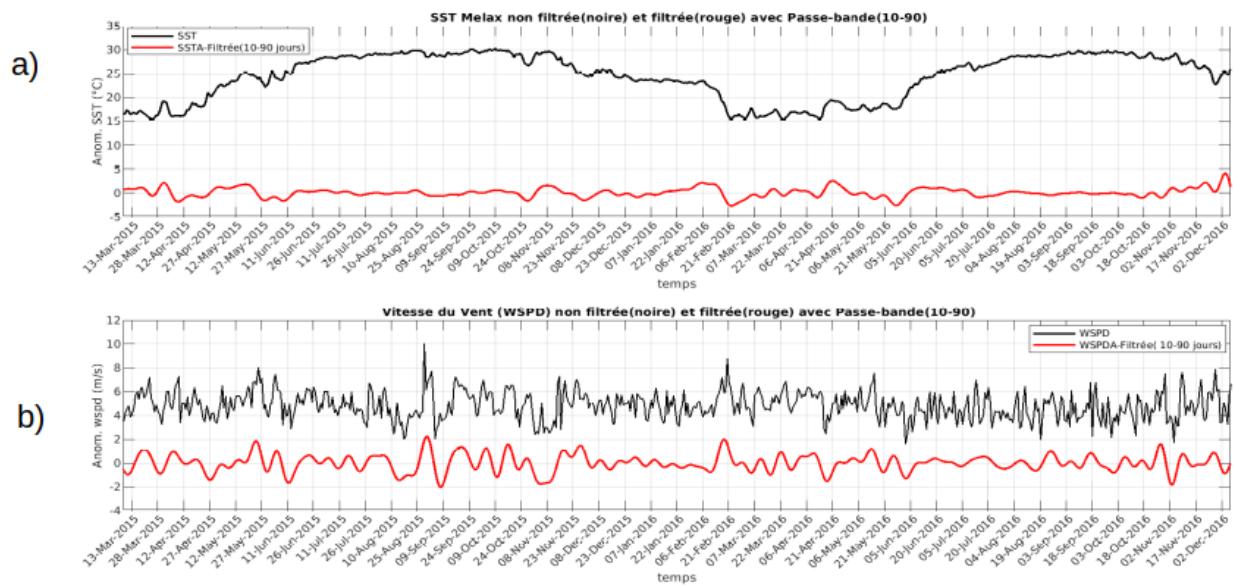


Figure .4: Figure montrant les variables filtrées (rouge) et non filtrées (noir) à l'intra-saisonnier (10-90)-jours avec (a): la SST Melax et (b): le vent Melax.