

# UNIVERSITÉ ASSANE SECK DE ZIGUINCHOR



**UFR Sciences et Technologies**

**Departement de Physique**

**Mémoire de Master**

**Mention : Physique et Applications**

**Spécialité : Sciences de l'Atmosphère et de l'Océan**

---

## **Caractérisation et évaluation des risques de pollution marine liés à l'exploitation du champ pétrogazier de Sangomar, Sénégal**

---

Présenté par : RAMATOULAYE DIAGNE

Sous la direction de DR SINY NDOYE

Sous la Supervision de DR BAMOL ALI SOW

Soutenu publiquement le 15/04/2024 devant le jury composé de :

PRENOM ET NOM	Grade	Qualité	Etablissement
SAMO DIATTA	Maître de Conférences CAMES	Président de jury	UASZ
HABIB BOUBACAR DIENG	Maître Assistant CAMES	Rapporteur	UASZ
MAMADOU LAMINE MBAYE	Maître de Conférences CAMES	Examineur	UASZ
SINY NDOYE	Maître Assistant CAMES	Directeur du mémoire	UAM
BAMOL ALI SOW	Maître de Conférences CAMES	Superviseur du mémoire	UASZ

# Dédicaces

## ALKHAMDOULILLAHI RABBIL ANLAMINE

À mon plus que tout, mon ami, mon confident, et mon compagnon de vie, **Cheikh Mouhamed Fadel Séne**. Ta lumière a illuminé chaque étape de notre parcours, des premiers jours de l'école primaire à nos rêves partagés de réussite universitaire. Ensemble, nous avons franchi les obstacles, célébré les victoires, et construit des souvenirs qui resteront à jamais gravés dans mon cœur.

Le chemin de la vie nous a séparés physiquement, mais ton esprit bienveillant continue de m'inspirer chaque jour. Ton départ prématuré le 21 Juin 2020 a créé un vide indescriptible emportant avec lui une partie de moi, mais je ressens ta présence à travers les souvenirs joyeux que nous avons partagés.

Ta lumière continue de briller dans mes souvenirs, éclairant mes jours sombres de ta gentillesse, de ta loyauté et de ton sourire radieux. Les mots semblent impuissants face à la perte immense que je ressens, mais je veux que le monde sache à quel point tu étais spécial. Ce travail t'est entièrement dédié, **Cheikh Mouhamed Fadel Séne**. Ta passion pour la connaissance et ta persévérance m'ont motivé à poursuivre mes études malgré la douleur de ton absence. Chaque page de ce mémoire est tissée avec les fils de nos rêves communs. La tristesse de ne pas avoir pu accomplir notre rêve de décrocher la licence ensemble est immense, mais je rends grâce à **ALLAH (SWT)** et porte ce travail en l'honneur de ta mémoire. Ton impact sur ma vie est incommensurable, et à travers ces mots, je veux que le monde sache à quel point tu as été une source d'inspiration constante.

Que la terre de Ndiaganio te soit légère mon cher. Ton souvenir restera vivant dans chaque réussite que je célèbre et dans chaque défi que je surmonte. Tu resteras éternellement dans mon cœur.

*Yalna Yërmändë sa BOROM (SWT) wacc ci sa kaw ba abadane ak bep waay dawlou Bidiahi Nabi Moustapha (SWS)*

# Remerciements

Je rends grâce à **ALLAH (SWT)** et pris sur le **Prophète Mouhamed (psl)**.

Ce travail a été réalisé avec l'appui financier de l'Agence Française pour le Développement (AFD) à travers le « Projet d'appui à la politique d'aires marines protégées du Sénégal à travers la conservation et la mise en valeur durables des mangroves de la Casamance et du Sine Saloum », mis en œuvre par la Direction des Aires Marines Communautaires Protégées (DAMCP) du Sénégal. Il s'inscrit dans le cadre d'un protocole de partenariat entre la DAMCP et l'Institut Universitaire de Pêche et d'Aquaculture (IUPA) de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD), en collaboration avec l'UFR Sciences et Technologie de l'Université Assane Seck de Ziguinchor, le Département Hydrosciences et Environnement de l'Université Iba Der Thiam de Thiès et l'Institut des Sciences de l'Environnement de l'UCAD et l'Université Amadou Mahtar Mbow de Diamniadio (UAM). Le principal objectif visé est d'augmenter l'expertise sur la thématique des AMP et de la mangrove. Au terme de ce travail, nous exprimons notre profonde gratitude au projet AMP Mangrove, à la DAMCP et à tous les partenaires

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mes parents, **Dr Abdoulaye Diagne** et **Ma Khady Lô**, pour leur soutien indéfectible tout au long de ce parcours académique. Leur amour, encouragement et sacrifices ont été les piliers essentiels qui m'ont permis d'atteindre ce stade de ma vie.

Maman, ton amour inconditionnel, ta sagesse et ton dévouement ont été une source d'inspiration constante. Merci pour tes conseils éclairés, ton réconfort inestimable, et pour être la force tranquille qui guide mes pas, **Ma meilleure amie**.

Papa, mon docteur, ton engagement envers mon éducation, ton exemple de persévérance, et tes encouragements constants ont été des moteurs puissants de ma réussite. Merci d'avoir été mon modèle de détermination et d'intégrité, **Mon idole**.

À mes frères et sœurs, **Mamadou, Ya Awa, Mbaye, Ousmane, Petit et Ahmed** vous êtes mes compagnons de vie, mes partenaires de rire, et mes plus grands supporters. Votre soutien inconditionnel, vos conseils avisés et votre présence joyeuse ont rendu ce voyage plus significatif. Merci d'avoir partagé avec moi chaque étape de cette aventure.

À toute ma famille élargie, vous avez été une source de force et de réconfort. Votre présence dans les moments de joie et de peine a été précieuse. Merci de m'avoir inspiré, encouragé et montré l'importance des liens familiaux.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mon superviseur de mémoire, **Dr Bammol Ali SOW**. Depuis mes premiers pas dans le domaine de l'océanographie à l'université, il a été une source inépuisable d'inspiration et de soutien. Monsieur, votre amour pour l'océanographie a été contagieux. Vos connaissances approfondies, votre dévouement et votre engagement envers notre succès académique ont été exemplaires. Vos conseils éclairés, votre encadrement attentif et vos encouragements constants ont grandement contribué à façonner ma compréhension de l'océanographie et à me guider tout au long de ce travail de mémoire. Je suis profondément reconnaissant pour votre mentorat exceptionnel et votre influence positive sur mon parcours académique. Je vous remercie infiniment pour votre soutien indéfectible et votre engagement à faire de cette expérience un succès. **Merci Mentor**.

---

Je souhaite exprimer ma sincère reconnaissance à mon directeur de mémoire, **Dr Siny NDOYE**. Sa disponibilité sans faille, son expertise approfondie et ses conseils judicieux ont été d'une valeur inestimable tout au long de ce travail. Sa passion pour le domaine de l'océanographie et son dévouement à l'égard de ses étudiants ont été une source d'inspiration constante. Grâce à ses explications claires, ses encouragements constants et sa gentillesse manifestée lors de mon stage à l'université Amadou Makhtar Mbow de Diamniadio, j'ai pu surmonter les défis et progresser dans mes recherches. Sa générosité, en partageant ses repas avec moi et notamment en me ramenant à la gare chaque soir, reflète son humilité et sa bienveillance à l'égard de ses étudiants. Je suis profondément reconnaissante pour son soutien inestimable et sa contribution à la réussite de ce travail de mémoire. **Merci Professeur.**

Mes remerciements sont aussi adressés au **Dr Moustapha Sow Cyprien** pour sa disponibilité, ses contributions, aides et conseils apportés à ce travail. Votre générosité et bienveillance ont été source de confiance et d'inspiration et je vous en suis reconnaissante.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes professeurs du **Master SAO**, **Dr Samo Diatta** qui a également accepté de présider ce travail, **Dr Joseph Diatta**, **Dr Mamadou Lamine Mbaye** pour sa disponibilité, ses conseils et d'avoir accepté d'être l'examineur de ce travail, **Dr Habib Boubacar Dieng** pour sa disponibilité, ses contributions apportées à cette étude ainsi que d'avoir accepté d'être le rapporteur de ce travail et enfin **Pr Moctar Camara**, pour leur dévouement, leur soutien et leur expertise tout au long de mes études. Leur passion pour leur domaine respectif m'a inspiré et motivé à poursuivre mes aspirations académiques. Je leur adresse mes plus sincères remerciements pour leur précieux soutien et leur dévouement sans faille.

Mes sincères remerciements aussi au **Dr Vincent Échevin** d'avoir mis à notre disposition les sorties de simulation CROCO sur la période 2017-2018.

Je remercie mes camarades de promo **Eliane**, **Atome** et **Doudou** pour leur soutien indéfectible et leur camaraderie tout au long de ce parcours académique. Merci à chacun d'entre eux pour avoir rendu ce voyage universitaire aussi enrichissant et mémorable.

Je souhaite exprimer ma sincère reconnaissance à mes collègues du Laboratoire **LOSEC**, "**LOSEC Family**", pour leur chaleureux accueil, leur soutien inestimable et leur esprit d'équipe exceptionnel. Leur collaboration et leur camaraderie en particulier **David Sagna**, **Dr Jules Basse**, **Souleymane Thiam**, **Issa BA** ont rendu mon expérience de recherche plus enrichissante et agréable. En particulier, je tiens à remercier mon prédécesseur dans le domaine **Birane NDOM** pour sa générosité, sa bienveillance et son expertise partagée. Ses conseils avisés, ses connaissances approfondies et son soutien constant ont grandement contribué à mon apprentissage et à ma progression dans le domaine. Sa gentillesse et sa disponibilité ont été une source d'inspiration pour moi, et je suis reconnaissante d'avoir eu l'opportunité de bénéficier de son encadrement. Je suis honorée d'avoir été accueillie au sein du laboratoire **LOSEC** et je suis reconnaissante pour les liens professionnels et amicaux que nous avons tissés. Leur collaboration et leur soutien ont été précieux tout au long de mon parcours académique et professionnel, et je leur suis profondément reconnaissant. Je tiens à remercier aussi les collègues du **LPAO/SF** pour leur accueil chaleureux et les échanges scientifiques menés lors de mon séjour à Dakar.

Mes sincères remerciements vont aux éminents professeurs que j'ai eu le privilège de rencontrer lors de mon stage à Diamniadio **Dr Serigne Fallou Pouye**, **Dr Makha Ndao**, **Dr Issa Sakho**, **Dr Coulibaly**, **Dr Sow**, **Dr Ndiaye**. Leur accueil chaleureux, leur disponibilité et leur générosité m'ont profondément touché. Leur engagement envers mes progrès académiques et leur désir sincère de partager leur expertise ont été une source d'inspiration tout au long de mon parcours. Leurs conseils éclairés et leurs encouragements constants ont enrichi mon expérience universitaire et m'ont permis de grandir professionnellement. Je suis reconnaissante pour les moments précieux partagés, que ce soit lors de nos discussions, de

nos rencontres informelles ou même de nos déjeuners ensemble. Leur bienveillance et leur soutien ont été inestimables et ont contribué de manière significative à mon développement personnel et académique. Je leur adresse mes plus sincères remerciements pour leur précieuse contribution à mon parcours éducatif et professionnel.

A mes tuteurs **Tonton Ablaye Diop, Dr Daouda Diouf, Tata Nabou et Tata Amina**, vous m'avez accueilli et encouragé durant tout mon parcours universitaire. Merci à vous.

Je ne saurais terminer sans exprimer ma profonde gratitude au **Dahira Matlaboul Fawzeyni et Jazbul Mouride**, source de réconfort et de soutien spirituel tout au long de mon parcours académique. Depuis ma première année, **DMF** m'a accueilli avec bienveillance, offrant une communauté chaleureuse où je pouvais partager mes expériences et mes aspirations, guidé par la sagesse et l'enseignement de notre guide spirituel, **Cheikh Ahmadou Bamba**. Le dahira a été un refuge où je pouvais trouver la paix intérieure et la force nécessaire pour surmonter les défis académiques et personnels. Les prières, les enseignements et les conseils bienveillants ont été une source d'inspiration et de réconfort, me permettant de rester ancré dans ma foi et de maintenir un équilibre entre mes aspirations académiques et ma vie spirituelle. Leur présence et leur soutien inconditionnel ont été un cadeau précieux, et je leur suis profondément reconnaissante pour leur impact positif sur ma vie.

**Serigne Alioune Badara Dieng**, un véritable pilier de sagesse et de bienveillance dans ma vie universitaire. Son soutien indéfectible et ses conseils avisés ont été pour moi une source d'inspiration et de réconfort. Sa présence bienveillante et son dévouement en tant que figure paternelle ont profondément marqué mon parcours académique. Je lui suis infiniment reconnaissante pour son amitié et sa guidance précieuse, qui ont contribué à façonner la personne que je suis aujourd'hui.

En particulier, **Serigne Massamba Ndiaye** dont la générosité et la bienveillance m'ont accompagné chaque nuit alors que je terminais mes activités tardives pendant mon stage. Sa présence réconfortante et son dévouement à veiller sur moi témoignent de l'esprit de solidarité et de soutien mutuel qui caractérise le dahira. Que nos chemins continuent de se croiser dans la lumière de la foi et de l'amitié.

Je remercie toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à ce travail.

# Table des matières

Dedicaces	i
Remerciements	ii
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	ix
Liste des abréviations	x
Résumé	xii
Abstract	xiii
INTRODUCTION	1
1 Généralités	3
1.1 <i>La Circulation Océanique</i>	3
1.1.1 <i>La Circulation Océanique au large des côtes Ouest-africaines</i>	3
1.1.2 <i>La Circulation le long de la côte sénégalaise</i>	7
1.2 <i>La pollution marine</i>	8
1.2.1 <i>Les différents types de pollution marine</i>	8
1.2.2 <i>La pollution due aux hydrocarbures offshore</i>	10
1.3 <i>Présentation de la zone d'étude</i>	11
1.4 <i>Caractéristiques des réservoirs et retombés attendus</i>	13
2 Méthodologie	16
2.1 <i>Présentation des différents types de données d'observations collectées dans la zone d'exploitation pétrolière SNE</i>	16
2.2 <i>Les stations de mesure</i>	17
2.3 <i>Présentation du modèle CROCO</i>	18
2.4 <i>Présentation de la configuration</i>	21
2.5 <i>Description du module lagrangien ROFF</i>	23
2.6 <i>Expériences</i>	23
3 Résultats et Discussion	25
3.1 <i>Analyse des données météorologiques et océanographiques prises dans la zone d'exploitation pétrolière SNE</i>	25
3.1.1 <i>La circulation océanique</i>	25
3.1.2 <i>Structure de la température de surface de la mer (SST)</i>	28
3.2 <i>Evaluation du Modèle</i>	30
3.3 <i>Les courants de surface du modèle</i>	33
3.4 <i>Trajectoire des particules</i>	34

---

3.5	<i>Dérive due au vent (dérive de Stockes)</i> . . . . .	38
3.6	<i>Proposition d'une cartographie des zones exposées</i> . . . . .	40
	<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES</b>	<b>44</b>
	<b>Annexe</b>	<b>52</b>

# Liste des figures

1.1	Carte des courants marins dans l'Atlantique . . . . .	5
1.2	Processus d'un upwelling côtier . . . . .	7
1.3	Ecosystèmes Marins, extrait du phénomène de Deep Water aux USA Extrait de [ <a href="https://ise.unige.ch/isdd/spip.php?article221">https://ise.unige.ch/isdd/spip.php?article221</a> ] consulté le 13 Janvier 2023 . . . . .	11
1.4	Les côtes sénégalaises . . . . .	12
1.5	Bathymétrie le long de la côte sud du Sénégal avec en carré blanc contour rouge, le point de mesure, le champs pétrogazier et l'AMP de Sangomar . .	13
1.6	Unité Flottante de Production, de Stockage et de Déchargement. Extrait de Itie,Sénégal . . . . .	14
2.1	Instrument de mesure du courant,extrait du rapport CAIRN . . . . .	17
2.2	Station de mesure . . . . .	18
2.3	Température de surface de la mer des deux grilles, (Ndoye, 2016 . . . . .	22
2.4	Position des particules lâchées au niveau de la zone d'exploitation de Sangomarle 01/01/2017. . . . .	23
3.1	Variation temporelle et verticale du courant méridien dans notre zone d'étude du 01 Avril au 19 Juillet 2017,mesuré par le mouillage de surface Wavescan	26
3.2	Variation temporelle et verticale du courant méridien dans notre zone d'étude du 14 Février au 14 Mai 2018,mesuré par le mouillage de surface Wavescan	26
3.3	Variation temporelle et horizontal du courant zonal dans notre zone d'étude du 01 Avril au 19 Juillet 2017,mesuré par le mouillage de surface Wavescan	26
3.4	Intensité du vent en bleu et des rafales en noir en 2017 . . . . .	27
3.5	Carte de rose des vents de 2017, mesuré par le mouillage de surface WS . .	28
3.6	Quelques cartes de SST journalières issues de toutes les données satellitaires disponibles en 2017. Pour chaque mois, une image de SST non impactée par les nuages et aérosols est choisie . . . . .	29
3.7	Variation temporelle et verticale du courant méridien des données en haut et du modèle en bas en 2017 . . . . .	31
3.8	Variation temporelle et verticale du courant méridien des données en haut et du modèle en bas en 2018 . . . . .	31
3.9	Evaluation de la SST simulée par le modèle à partir des données satellitaires à gauche avec le modèle à droite pour le mois de Mai 2017 . . . . .	32
3.10	Evaluation de la SST simulée par le modèle à partir des données satellitaires à gauche avec le modèle à droite pour le mois de Mai 2018 . . . . .	32
3.11	Variations spatiales et temporelles des courants et de la température de surface. La SST est représentée en couleur et les courants par les flèches. . . .	33
3.12	Carte de courant de surface moyennée JJFMAM à droite et JJAS à gauche avec en carré noir le champs pétrolier . . . . .	34
3.13	Trajectoire (en rouge) de 1000 particules lâchées au niveau du champ pétrolier de Sangomar (tâche noire) durant toute l'année 2017 . . . . .	36

---

3.14	Nombre de particules arrivant dans chaque zone d'intérêt durant toute l'année 2017 . . . . .	37
3.15	Nombre de particules arrivant dans chaque zone d'intérêt durant toute l'année avec l'effet de la dérive de Stockes . . . . .	39
3.16	Cartographie des zones exposées (en bleu) avec en flèches noirs les courants de surface moyens et en carré noir le champs pétrolier de Sangomar . . . . .	41
3.17	Zone Sangomar, habitat pour les petits pélagiques, source : <a href="https://papaco.org/wp-content/uploads/2021/07/Gp1EcosystemesDeltaSaloum.pdf">https://papaco.org/wp-content/uploads/2021/07/Gp1EcosystemesDeltaSaloum.pdf</a> , consulté le 26 Janvier 2024 . . . . .	41
3.18	AMP Abene, Mangroves, <a href="https://www.alamyimages.fr/photos-images/mangrove-senegal.html?sortBy=relevant">https://www.alamyimages.fr/photos-images/mangrove-senegal.html?sortBy=relevant</a> , consulté le 26 Janvier 2024 . . . . .	42
3.19	Zone Sud , Zone de pêche, <a href="https://www.seneweb.com/news/pecheurs">https://www.seneweb.com/news/pecheurs</a> , consulté le 28 Janvier 2024 . . . . .	42
3.20	Carte de localisation de l'AMP de Sangomar . . . . .	53

# Liste des tableaux

2.1	Paramètres de la configuration des deux grilles (Ndoye, 2016) . . . . .	22
-----	---	----

# Liste des abréviations

**ADCP** : Acoustic Doppler Current Profil

**API** : American Petroleum Institute

**AMP** : Aire Marine Protégée

**Can10** :Canary 10km de Résolution

**CROCO** :Coastal and Regional Ocean Community Model

**CNEA** : Courant Nord Equatorial Atlantique

**CVFZ** : Zone Frontale du Cap-Vert

**FPSO** : Unité Flottante de Production, de Stockage et de Déchargement

**GLORYS** : Global Ocean Reanalysis and Simulations

**JJAS** : Juin Juillet Aout Septembre

**JFMAM** : Janvier Février Mars Avril Mai

**LCM** : Long Current Mooring

**MODIS** : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

**OBC** : Open Boundary Condition

**ROFF** : Roms Offline Floats

**RNC** : Réserve Naturelle Communautaire

**RSSD** : Rufisque Sangomar Sangomar Deep

**SCUS** : Système d'Upwelling des Canaries

**SNE** : Senegal

**Sen2** :Senegal à 2km de résolution

**SST** : Temperature de Surface de la mer

**WS** : WaveScan

**ZCIT** : Zone de Convergence Inter-Tropicale

# Résumé

L'exploitation programmée d'hydrocarbures au large des côtes sénégalaises fait redouter des possibles menaces sur les activités économiques en mer et notamment l'activité de pêche (sous ses nombreuses formes). L'objectif de ce travail est d'étudier la circulation côtière et les risques de pollution sur la côte sud du Sénégal. Une analyse basée sur les données in-situ météo-océaniques collectées dans la zone d'étude, les sorties du modèle océanographique CROCO et les simulations lagrangiennes faites avec le module lagrangien ROFF, a permis de faire une analyse approfondie des courants marins, de la température de surface de la mer, et des trajectoires de particules, formant ainsi le cadre essentiel pour évaluer les risques environnementaux liés à l'exploitation pétrolière du champ Sangomar.

Cette analyse montre une forte variabilité saisonnière des paramètres physiques (température, salinité et courants). Les expériences lagrangiennes ont permis de mettre en évidence l'impact potentiel des fuites d'hydrocarbures. En analysant les données recueillies, nous avons identifié les zones les plus exposées notamment les zones côtières aux risques environnementaux liés à l'exploitation pétrolière dans la région de Sangomar. Une cartographie des zones exposées en lien avec la circulation océanique dans la zone est ainsi proposée. Cette recherche contribue significativement à la compréhension de la dynamique océanique locale et fournit des informations cruciales pour la préservation des écosystèmes marins. Elle ouvre également des perspectives pour une exploitation pétrolière responsable dans la région, soulignant l'importance de concilier développement économique et protection de l'environnement. Elle offre ainsi des recommandations importantes pour la gestion durable des écosystèmes marins et souligne l'urgence de mettre en œuvre des mesures de préservation pour protéger ces zones d'intérêt.

- **Mots clés** :Circulation océanique, Exploitation pétrolière, Pollution marine, Champs Sangomar, Sénégal, Courants marins, Température de surface de la mer, Trajectoires des particules, Hydrocarbures

# Abstract

The planned exploitation of hydrocarbons off the coast of Senegal has raised fears of possible threats to offshore economic activities, particularly fishing (in its many forms). The aim of this work is to study coastal circulation and pollution risks on the south coast of Senegal. An analysis based on in-situ meteo-oceanic data collected in the study area, outputs from the CROCO oceanographic model and Lagrangian simulations performed with the ROFF Lagrangian module has enabled an in-depth analysis of marine currents, sea surface temperature and particle trajectories, thus forming the essential framework for assessing the environmental risks associated with oil exploitation. It shows strong seasonal variability in physical parameters (temperature, salinity and currents). Lagrangian experiments have highlighted the potential impact of oil spills. By analyzing the data collected, we identified the most sensitive areas, particularly coastal zones, to the environmental risks associated with oil exploitation in the Sangomar region. Mapping of exposed areas in relation to ocean circulation in the area is thus proposed.

This research contributes significantly to our understanding of local ocean dynamics and provides crucial information for the preservation of marine ecosystems. It also opens up prospects for responsible oil exploitation in the region, underlining the importance of reconciling economic development with environmental protection. It thus offers important perspectives for the sustainable management of marine ecosystems, and underlines the urgency of implementing conservation measures to protect these critical areas.

- **Keywords** :Ocean Circulation, Oil Exploitation, Marine Currents, Sea Surface Temperature, Particle Trajectories, Hydrocarbons, Senegal, Sangomar fields, pollution risks

# INTRODUCTION

La préservation de l'environnement marin est une préoccupation croissante à l'échelle mondiale en raison des pressions anthropiques croissantes. Les activités d'exploitation des ressources naturelles, en particulier l'exploitation pétrolière offshore, peuvent avoir des conséquences néfastes sur les écosystèmes marins fragiles. Le champ pétrogazier de Sangomar, situé à 100 km au sud de Dakar, au Sénégal, est un exemple pertinent de cette problématique. L'exploitation de ce champ présente des défis significatifs en termes de gestion durable et de préservation de la biodiversité marine.

L'environnement marin autour du champ de Sangomar est caractérisé par une diversité biologique riche et des écosystèmes côtiers sensibles. L'exploitation pétrogazière dans cette région soulève des préoccupations quant aux impacts potentiels sur ces écosystèmes, notamment en cas de déversement accidentel d'hydrocarbures. Il est alors crucial de comprendre comment ces activités peuvent affecter la dynamique océanique et, par conséquent, la dispersion des polluants.

Cette étude a pour objectif principal de proposer une cartographie des zones les plus exposées à la pollution marine, fournissant ainsi des alternatives potentielles pour une exploitation plus responsable des ressources océaniques. Pour atteindre cet objectif principal, nous proposons comme objectifs spécifiques de réaliser une analyse approfondie de la circulation océanique et des phénomènes associés (Sow, 2014), d'interpréter la trajectoire des particules en cas de déversement accidentel d'hydrocarbures, et d'analyser les impacts potentiels de ces hydrocarbures sur les zones d'intérêt.

Notre méthodologie de recherche est basée sur l'utilisation de données in-situ collectées dans la zone d'étude, de sorties du modèle océanique CROCO (Coastal and Regional Ocean Community Model) et du module lagrangien ROFF (Roms Offline Floats) (Ndoye et al., 2016). Cette combinaison permet une évaluation détaillée de la dynamique océanique et une simulation précise de la dispersion des polluants.

Nous cherchons à comprendre la dynamique océanique à différentes échelles (Diop, 2019), de la grande à la moyenne échelle, avant de nous focaliser sur la zone spécifique de Sangomar. Cette approche en cascade nous permettra d'appréhender les influences multiples et complexes qui façonnent la circulation marine dans cette zone cruciale. Un aspect clé de cette étude repose sur une évaluation critique du modèle océanique CROCO, afin de garantir la fiabilité de nos résultats. L'intégration du module lagrangien ROFF pour le suivi des particules ajoutera une dimension temporelle à notre cartographie, offrant ainsi une perspective dynamique des déplacements potentiels des éléments polluants l'environnement marin. Cette étape est particulièrement importante pour mieux anticiper les conséquences de l'exploitation du champ pétrogazier sur les zones marines avoisinantes.

En résumé, ce projet de recherche s'inscrit dans une démarche scientifique complète, visant à approfondir la compréhension des risques de pollution marine associés à l'exploitation du champ pétrogazier de Sangomar. Au-delà de l'analyse de ces risques, notre ambition est de contribuer activement à l'élaboration de recommandations pratiques pour une gestion durable de cette activité, garantissant ainsi la préservation de l'écosystème marin et la pro-

tection des intérêts socio-économiques de la région.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

- Le chapitre 1 présente quelques généralités sur la circulation océanique ouest-africaine et sur la pollution liée aux hydrocarbures ainsi que la présentation de notre zone d'étude, le champ pétrogazier de Sangomar.
- Le chapitre 2 présente les données utilisées dans cette étude et la méthodologie adoptée pour le traitement des données in-situ et satellitaires ainsi qu'une description du modèle de circulation océanique régionale utilisé.
- Enfin le chapitre 3 présente la validation du modèle, la caractérisation des masses d'eau et l'identification et la cartographie des zones les plus exposées à travers une étude de dispersion des particules.

Ces trois chapitres sont encadrés par une introduction et une conclusion dans laquelle nous présentons quelques perspectives et recommandations.

# Chapitre 1

## Généralités

### 1.1 *La Circulation Océanique*

La circulation océanique générale fait référence au mouvement continu des masses d'eau à travers les océans de la planète. Cette circulation est causée par plusieurs forces, notamment le frottement du vent à la surface de la mer, les différences de température et de salinité ainsi que la rotation de la Terre etc.

La circulation océanique est mise en évidence par les courants de surface et les courants profonds (Diop,2019). Les courants de surface sont principalement influencés par les vents et sont responsables du transport des eaux de surface chaudes des tropiques vers les hautes latitudes et des eaux de surface froides des hautes latitudes vers l'équateur. Les courants de fond quant à eux résultent des différences de densité causées par les variations de température et de salinité.

En effet, les vents à la surface exercent une force de friction responsable de l'apparition de courants marins spécifiques. Ces derniers se dirigent perpendiculairement à la direction du vent, vers la droite dans l'hémisphère Nord et vers la gauche dans l'hémisphère Sud. La rencontre de tels courants engendrent des zones de convergence ou de divergence qui sont à l'origine des phénomènes d'upwelling (remontée des eaux froides vers la surface) et de downwelling (plongée des eaux de surface vers le fond).

Cette circulation engendrée par les vents est de loin la plus dynamique et la plus énergétique et elle est aussi au contrôle de la majeure partie des phénomènes de petites échelles (Ndoye et al, 2016).

Après avoir exploré la circulation océanique générale qui prévaut dans la région, nous nous intéressons à la dynamique de la circulation océanique ouest-africaine plus particulièrement aux caractéristiques qui définissent les mouvements marins le long des côtes ouest-africaines, offrant ainsi une compréhension approfondie des facteurs qui influencent la région du champ pétrogazier de Sangomar.

#### 1.1.1 *La Circulation Océanique au large des côtes Ouest-africaines*

La circulation océanique le long de la côte ouest-africaine est une dynamique complexe influencée par plusieurs facteurs majeurs :

- le courant de Guinée qui s'écoule du Sud au Nord de la région en provenance du Golfe de Guinée (Sow,2014),
- le courant des Canaries, protagoniste principal de cette région, qui longe les côtes mauritaniennes jusqu'au nord du Sénégal, interagit de manière significative dans la circulation régionale (Ndoye,2016),
- le courant nord-équatorial atlantique qui prend naissance vers les îles du Cap-Vert et qui transporte les eaux froides du courant dit des Canaries vers l'Ouest (Diop,2019).

Néanmoins, l'influence des vents saisonniers dominants génèrent des courants de surface significatifs qui jouent un rôle important dans la dynamique de la zone. Le plateau continental Ouest-africain est soumis au cours de l'année à l'alternance de trois flux principaux (Sow,2014). Il s'agit de :

- L'alizé continental ou l'harmattan de secteur Nord-Est qui provient de la dépression saharienne et qui transporte de l'air chaud et sec du Sahara vers l'atlantique en hiver.
- L'alizé maritime issu de l'anticyclone des Açores de secteur Nord-Ouest est responsable des alizés du Nord au printemps.
- Le flux de mousson de secteur Sud-Ouest provenant de l'anticyclone de Saint-Hélène est responsable des vents du Sud en été.

En somme, la circulation océanique ouest-africaine est un système dynamique, modulé par le courant de Guinée, l'influence du courant des Canaries (Voir figure 1.1) et les vents dominants. La compréhension de ces dynamiques est cruciale pour évaluer les risques environnementaux, notamment dans le contexte de l'exploitation du champs pétrogazier de Sangomar.

#### – *Le Courant de Guinée*

Le courant de Guinée suit une trajectoire le long de la côte sénégalaise, découlant du Sud vers le Nord. Le contre-courant équatorial se dirigeant vers l'Est entre 5 et 10 degrés Nord s'infléchit vers le Sud-Est pour former le courant de Guinée (Sow,2014). Ce dernier joue un rôle essentiel dans le transfert de chaleur et de nutriments. Les vents dominants en saison de mousson contribuent à la formation de ce courant. Les eaux transportées par le courant de Guinée se déplacent du Sud vers le Nord le long de la côte sud-africaine. Ainsi, il demeure saisonnier et est plus intense en été à cause de la migration de la Zone de Convergence Inter-Tropical (ZCIT) vers le Nord (Sow,2014). En raison de sa proximité avec la côte, les particules flottantes suivent généralement cette trajectoire en été. Néanmoins, il interagit de manière significative avec d'autres courants régionaux tels que le système des Canaries et le Courant Nord-Équatorial Atlantique (CNEA) ce qui rend plus complexe la dynamique dans cette région.

#### – *Le Courant des Canaries*

Le système de courant des Canaries est l'un des quatre grands systèmes d'upwelling dans le monde et exerce une influence significative sur la circulation de l'océan Atlantique en général et la circulation ouest-africaine en particulier. Il se situe le long de la côte Nord-Ouest de l'Afrique depuis Gibraltar (36°N) jusqu'au Sénégal (10°N) longeant les côtes du Maroc, de la Mauritanie, de la Gambie et du Sénégal, il s'étend sur plus de 3800km de côte et sur des centaines de kilomètres au large (Ndoye,2016). Il se traduit par un courant général de surface bordant la côte du Nord au Sud. Le cycle saisonnier de ce courant est lié à la

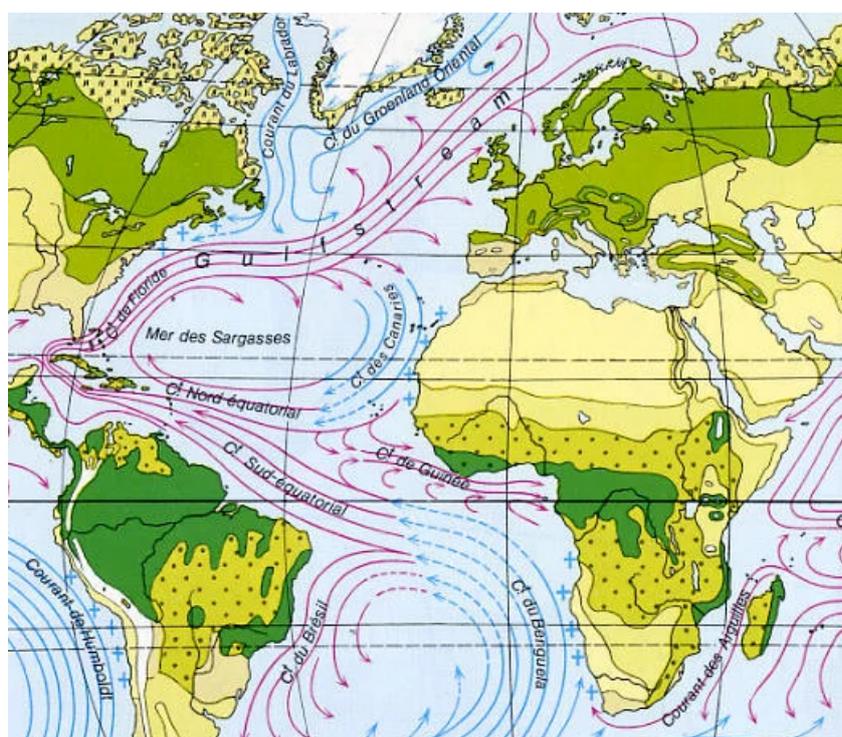


FIGURE 1.1 – Carte des courants marins dans l'Atlantique. Extrait de [<https://www.lililamouette.com/la-mer/observer-la-mer/les-courants-océaniques>] consulté le 15 Décembre 2023.

migration de la ZCIT : le courant des Canaries atteint sa position la plus au Sud lorsque la ZCIT est située plus au Sud (Fedoseev,1970).

La branche Sud de la partie Est du gyre subtropical qui représente le "Gulf stream" alimente le courant des Canaries qui s'écoule le long des côtes africaines (Jeyid,2019). Arrivé au niveau du Cap Blanc (21°N), le courant des Canaries bifurque vers l'Ouest pour former le courant Nord Équatorial Atlantique (CNEA) comme l'illustre la figure 1.1. En effet, le système de courants des Canaries peut-être subdivisé en deux domaines : la zone occupée par les eaux centrales nord-atlantiques plus chaudes et celles des eaux centrales sud-atlantiques moins salées et dont la teneur en sels minéraux est plus forte (Ndoye,2016). Ces deux domaines sont séparés par la zone frontale du Cap-Vert (CVFZ), qui s'étend entre le Cap Blanc et l'archipel du Cap-vert (barton et al.,1998). Le CVFZ constitue une barrière entre les eaux atlantiques du Nord (gyre subtropical) et les eaux atlantiques du Sud (shadow zone). Cette barrière force le courant des Canaries à s'écouler vers le Sud-Ouest renforçant ainsi le CNEA qui constitue la branche Sud-Ouest du gyre subtropical Nord (Sow,2014).

### – *Le Courant Nord-Équatorial*

Le CNEA qui est le prolongement vers l'Ouest du courant des Canaries s'écoule au Nord de la CVFZ (Stramma et Müller 1989) et contribue à la circulation générale. Il joue un rôle majeur dans la distribution de la chaleur, des nutriments et des organismes marins. En se déplaçant vers le Nord-Ouest de la région équatoriale, il est à l'origine du transport d'énergie et de chaleur dans la zone (Diop, 2019). Ainsi, les eaux réchauffées par le soleil dans la région équatoriale sont transportées vers les latitudes plus élevées, modulant ainsi les températures de l'océan atlantique tropical et subtropical. Le CNEA, en tant que transporteur de chaleur et de nutriments, joue également un rôle dans la dynamique de l'écosystème marin. Les variations de température et la disponibilité des nutriments le long de sa trajectoire peuvent avoir des impacts directs sur les espèces marines.

L'étude des courants océaniques dans l'Atlantique, en particulier le courant de Guinée, le courant des Canaries et le courant nord-équatorial atlantique, révèle une complexité dynamique qui façonne la circulation ouest-africaine. Ces courants agissent comme des acteurs majeurs de la redistribution océanique influençant la température, la salinité, la productivité biologique et la dispersion potentielle des particules (P.Puerta, 2020).

Le courant de Guinée, avec sa trajectoire du Sud vers le Nord, joue un rôle crucial dans le transport des eaux chaudes tropicales et modère les conditions climatiques le long de la côte ouest-africaine. Sa proximité avec le continent (partie terrestre) et son interaction avec les zones d'upwelling qui contribuent à une production biologique élevée influencent directement les activités humaines, notamment la pêche (Sow,2014).

Le courant des Canaries, descendant depuis les hautes latitudes, introduit des eaux plus froides le long de la côte ouest-africaine. Son interaction avec le courant de Guinée crée des zones de transition thermique, favorisant la biodiversité marine et pouvant avoir des conséquences sur les activités de pêche et de dispersion des particules (Ndoye,2016).

Quant au CNEA, il agit comme "autoroute océanique", transportant des eaux chaudes vers les latitudes les plus élevées. Son rôle dans la régulation thermique de l'Atlantique et son interaction avec d'autres courants contribuent à la complexité de la circulation océanique de la région (Diop, 2019).

Cette analyse partielle souligne l'importance et la nécessité de comprendre la dynamique de ces courants pour évaluer les risques environnementaux. Une compréhension approfondie de ces courants est essentielle pour formuler des stratégies de gestion durable et minimiser les impacts néfastes sur la biodiversité marine et les communautés côtières.

### – *La dynamique d'un upwelling Côtier*

Le phénomène d'upwelling est un pilier fondamental de l'hydro-climat des côtes sénégalaises. Il est responsable des ressources halieutiques abondantes dans les eaux marines côtières et impacte positivement l'activité de pêche.

L'upwelling côtier se présente comme un processus océan-atmosphère, se manifestant le long des bords Est des océans Atlantique et Pacifique. Les alizés du Nord longeant les côtes africaines entraînent une dérive des eaux de surface vers le large (dérive d'Ekman) et une remontée des eaux de fond riches en nutriments dans la zone côtière : c'est le phénomène d'upwelling. Les eaux situées à quelques centaines de mètres au moins, sont remontées vers la zone euphotique (couche de surface éclairée par la lumière du soleil) sous l'effet du vent côtier. Les sels nutritifs transportés dans les couches superficielles éclairées produisent le phytoplancton via la photosynthèse. Ce phytoplancton est le premier élément du réseau trophique.

Les côtes du Sénégal, de la Mauritanie et de la Guinée constituent la partie méridionale du Système d'Upwelling des Canaries (SCUS) (Mbaye, 2015 ; Faye,2015 ; Sow,2014 ; Ndoye,2016). Le système d'Upwelling des Canaries est l'un des quatre grands systèmes d'upwelling côtier avec le système du Pérou-Chili, de la Californie et du Benguela. Ces écosystèmes sont le siège d'un phénomène d'upwelling côtier où des eaux profondes riches en nutriments remontent en raison du vent soufflant parallèlement à la côte et dirigé vers l'équateur (figure 1.2).

La présence de nutriments dans ces eaux profondes fait des systèmes d'upwelling côtier les zones parmi les plus productives au monde en termes de pêche (Chavez et Messié, 2009). L'upwelling côtier sénégalais est la partie Sud du Système des Canaries (Sow,2014). De part sa saisonnalité due au déplacement méridional des alizés, il se produit de Novembre à Mai et peut-être subdivisé en deux saisons (Ndoye et al,2016) :

– *Une période froide* de type advectif à upwelling faible (Novembre à Janvier) carac-

térisée par des vents faibles et irréguliers ( installation des alizés) ;

- **Une période chaude** à upwelling fort (Février à Avril) caractérisée par des vents forts ( alizés établis).

Selon Taleb (2005), les principales zones d'upwelling au Sénégal sont localisées à environ 16°N (Saint Louis), où un upwelling côtier est observé de Novembre à Mai, et à environ 14,44°N (Presqu'île du Cap Vert). Au sud du Cap Vert, le plateau s'élargit et devient moins profond, avec un upwelling se produisant au centre du plateau, atteignant son maximum entre février et avril (Ndoye et al., 2014).

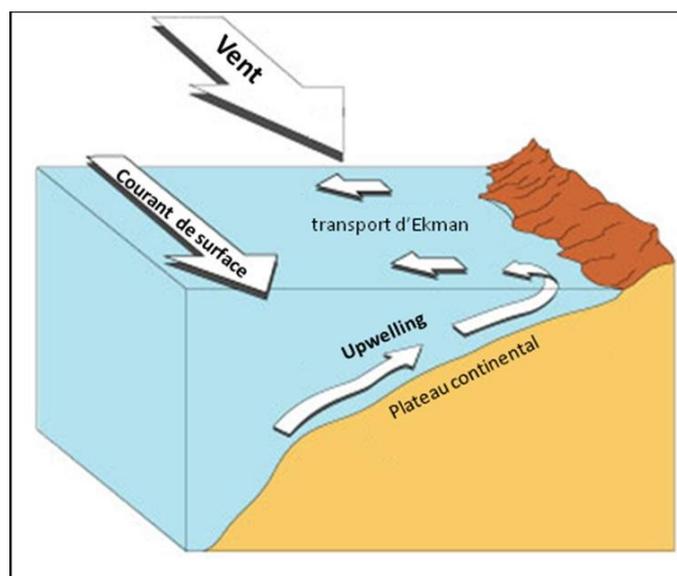


FIGURE 1.2 – Processus d'un upwelling côtier. Extrait de [<https://A-Transport-dEkman-B-Mise-en-place-dun-upwelling-cotier>]consulté le 15 Décembre 2023.

En conséquence, l'impact de la pollution marine de ces zones peut être néfaste pour l'activité de pêche qui est assez rentable pour le Sénégal et qui héberge une biodiversité marine importante dont ce secteur dépend entièrement pour sa survie.

### 1.1.2 La Circulation le long de la côte sénégalaise

La circulation au niveau de la côte sénégalaise est fortement influencée par plusieurs facteurs, parmi lesquels les vents et les gradients de pression nord-sud. Les vents exercent une influence significative sur la climatologie et la dynamique des courants dans la région. En effet, les alizés, vents soufflant d'Est en Ouest, sont responsables de la création de deux grandes circulations superficielles au large de la côte sénégalaise :

- **Courant Nord-Équatorial Atlantique (CNEA)** : originaire des îles du Cap-Vert, ce courant transporte les eaux froides du courant des Canaries vers l'Ouest (Diop,2019).
- **Contre-Courant Équatorial** : Il transporte vers l'Est les eaux chaudes et salées formées sur le bord sud du courant Nord-Équatorial. On peut le considérer comme un courant de compensation, agissant pour contrebalancer la masse d'eau déplacée par le courant Nord-Équatorial (Sow, 2014).

Tout au long de l'année, le plateau continental connaît simultanément deux périodes distinctes :

- **Une première période** caractérisée par des courants orientés vers le Sud-Ouest, accompagnés d'eaux froides, s'étendant de Novembre à Mai. Le courant froid provenant du Nord est communément appelé le courant des Canaries (Ndoye, 2016).
- **Une seconde période**, moins stable, survenant de Juillet à Août, où les courants s'inversent pour être dirigés vers le nord, transportant cette fois-ci des eaux chaudes (Diouf, 1993).

La répartition des différentes catégories d'eaux devant les côtes sénégalaises dépend étroitement de la circulation horizontale et verticale.

## 1.2 *La pollution marine*

La pollution marine est un problème complexe et grave qui découle de l'introduction d'éléments indésirables dans les écosystèmes marins. Elle fait référence à la contamination de l'environnement marin par des substances nocives, entraînant des conséquences négatives pour les écosystèmes aquatiques, la faune marine, la santé humaine et les activités économiques liées à la mer. La pollution marine a des conséquences dévastatrices sur les écosystèmes marins. Les substances chimiques, les déchets et les contaminants peuvent altérer la qualité de l'eau, entraînant la mort de la vie marine, la perturbation des chaînes alimentaires et la dégradation des habitats (Eirini, 2013).

Les principales sources de pollution marine comprennent les rejets industriels, les déchets urbains et industriels, les déversements de pétrole, les produits chimiques agricoles, les plastiques, les eaux usées non traitées, et les activités de transport maritime. Les substances polluantes incluent les hydrocarbures, les métaux lourds, les produits chimiques toxiques, les nutriments en excès (comme les nitrates et les phosphates), les plastiques, les déchets solides et les organismes pathogènes.

Du point de vue économique, elle peut entraîner des pertes importantes et affecter les industries de la pêche et de l'aquaculture, le tourisme côtier, et d'autres activités liées à la mer, compromettant ainsi les moyens de subsistance des communautés dépendantes des ressources marines. Ainsi la pollution marine peut se présenter sous plusieurs formes.

### 1.2.1 *Les différents types de pollution marine*

Les diverses formes de pollution marine, telles que les déversements de pétrole et l'acidification des océans, contribuent à la perte de biodiversité marine. Les coraux, les poissons, les mammifères marins et d'autres espèces sont exposés à des risques accrus en raison de la pollution.

En fonction de leur origine, on peut classer les pollutions marines en deux catégories (Eirini, 2013) : les pollutions accidentelles, qui résultent de déversements non intentionnels, généralement limités dans le temps de substances polluantes, et les pollutions occasionnelles. En ce qui concerne la nature des polluants, on peut faire une distinction entre les pollutions thermiques, les pollutions physiques et les pollutions engendrées par les métaux lourds (polluants inorganiques) et pollutions chimiques, engendrées par tout rejet dans la mer de substances naturelles ou synthétiques nuisibles à l'environnement.

---

– ***La pollution physique***

La pollution marine physique se réfère à la présence de débris solides et d'objets matériels dans les océans, mers, et autres étendues d'eau. Contrairement à d'autres formes de pollution qui peuvent être invisibles à l'œil nu, la pollution marine physique est souvent évidente et tangible (Meriem et Wissam,2020). Les déchets plastiques constituent l'une des formes les plus répandues de pollution marine physique. Cela inclut les bouteilles en plastique, les sacs, les emballages et autres articles en plastique qui sont déversés dans les océans. En plus des déchets plastiques visibles, il y a aussi la préoccupation croissante des micro plastiques, de minuscules particules de plastique résultant de la dégradation des déchets plastiques plus importants. Son impact sur la faune marine est négatif car les animaux marins, tels que les oiseaux, les poissons et les mammifères marins, peuvent être affectés par cette pollution en ingérant ces débris. Cela peut entraîner des problèmes de santé, voire la mort d'espèces.

La gestion de la pollution marine physique nécessite des efforts à plusieurs niveaux, de la réduction de l'utilisation de plastiques à la mise en œuvre de pratiques de gestion des déchets plus durables, en passant par la sensibilisation du public aux impacts de cette forme de pollution sur les écosystèmes marins.

– ***la pollution thermique***

La pollution thermique se produit lorsque la température de l'eau dans les océans est modifiée de manière significative par des activités humaines. Elle est généralement causée par les rejets d'eau chaude provenant d'activités industrielles, notamment les centrales électriques, les installations de refroidissement industrielles et d'autres procédés qui utilisent l'eau pour dissiper la chaleur (Meriem et Wissam,2020). Ces rejets d'eau chaude provenant de ces sources humaines entraînent une augmentation significative de la température de l'eau dans les zones environnantes. Cela peut être particulièrement problématique dans les zones côtières et les estuaires, car les organismes marins sont sensibles aux variations de température. En effet, une augmentation soudaine de la température de l'eau peut avoir des effets néfastes sur la faune et la flore marines. Certains organismes peuvent ne pas tolérer ces changements thermiques et peuvent être contraints de se déplacer vers des zones plus propices (Jeanne,2000). Ceci peut entraîner des perturbations au niveau des écosystèmes marins en modifiant les conditions environnementales marines pouvant générer des changements dans la distribution des espèces, l'abondance des populations et la structure des communautés marines. Certains organismes marins, en particulier les espèces qui ont des exigences de température spécifiques pour la reproduction et la croissance, peuvent être gravement touchés par cette pollution. Ainsi, dans de nombreux pays comme la France (Pantelodimou,2013), il existe des réglementations visant à limiter les rejets d'eau chaude provenant d'installations industrielles afin de minimiser les effets de la pollution thermique.

– ***La pollution par les métaux lourds***

La pollution marine par les métaux lourds est un problème environnemental sérieux causé par le rejet de métaux lourds toxiques dans les océans. Les principales sources de métaux lourds dans les océans sont issues des rejets industriels, des déchets miniers et des eaux de ruissellement contaminées provenant des zones urbaines et agricoles. Les métaux lourds couramment associés à la pollution marine comprennent le mercure, le plomb, le cadmium, le cuivre, le zinc et l'aluminium. Ces métaux sont sou-

vent utilisés dans diverses industries et dans l'agriculture par les engrais chimiques et pesticides transportés par le ruissellement des eaux de pluie et peuvent se retrouver dans l'environnement aquatique à des concentrations nocives. Les métaux lourds ont la capacité de s'accumuler dans les organismes marins par le biais d'un processus appelé bioaccumulation. Cela signifie que ces métaux peuvent passer à travers la chaîne alimentaire entraînant ainsi des effets toxiques sur la faune marine porteurs de problèmes de reproduction, des malformations, et dans certains cas, la mort des organismes marins (Fadda et Khira,2016). Et enfin de compte, cette pollution peut engendrer des problèmes de santé car la consommation de poissons et de fruits de mer contaminés par des concentrations élevées de métaux lourds peut avoir des effets néfastes sur la santé humaine. La lutte contre cette pollution marine implique la mise en œuvre de pratiques industrielles plus propres, le traitement efficace des eaux usées et la réduction des déchets toxiques.

### – *La pollution chimique*

La pollution marine chimique résulte de la présence d'une variété de substances chimiques toxiques dans les océans. Les substances chimiques impliquées dans la pollution marine comprennent des produits chimiques industriels, des pesticides, des métaux lourds, des produits pharmaceutiques, des produits chimiques domestiques et des hydrocarbures qui font l'objet de notre étude. De nombreuses substances chimiques ont la capacité de s'accumuler dans les organismes marins par le biais de la bioaccumulation. Cela signifie que ces substances peuvent se concentrer à des niveaux plus élevés au sein de la chaîne alimentaire marine présentant ainsi des risques pour la santé humaine, notamment par le biais de la consommation de fruits de mer contaminés par des produits chimiques toxiques.

## 1.2.2 *La pollution due aux hydrocarbures offshore*

Les hydrocarbures représentent la plus importante source de pollution des eaux océaniques ( AS Fernand, 2017). Cette pollution peut être accidentelle ou volontaire. La pollution par les hydrocarbures d'origine naturelle se produit lorsque des hydrocarbures, tels que le pétrole brut, sont libérés dans l'environnement sans intervention humaine directe. Contrairement aux déversements causés par des activités humaines, ces événements résultent de processus naturels tels que les éruptions de pétrole en mer ou les fuites de gaz naturel.

### – *La pollution d'origine naturelle*

Les éruptions de pétrole en mer se produisent lorsque des gisements de pétrole sous-marins sont perturbés, entraînant la libération de grandes quantités de pétrole brut dans l'eau. Ces éruptions peuvent être déclenchées par des mouvements tectoniques, des glissements de terrain sous-marins ou d'autres processus géologiques (Housem,2015). Les hydrocarbures présents dans le pétrole sont également des composés chimiques. Lorsque le pétrole est présent dans l'eau, il libère des substances chimiques toxiques qui peuvent avoir des effets néfastes sur les organismes marins. La pollution chimique associée au pétrole peut entraîner des impacts à long terme sur la santé des écosystèmes marins. Bien que cet événement soit d'origine naturelle, il peut avoir des impacts significatifs sur les écosystèmes marins (figure 1.4). Les hydrocarbures libérés peuvent causer des dommages aux organismes marins, aux récifs coralliens et à d'autres habitats côtiers. En effets, les hydrocarbures du pétrole peuvent être bioac-

cumulés dans les organismes marins, contribuant ainsi à la pollution chimique. Les espèces marines peuvent absorber ces composés toxiques par le biais de leur alimentation, et cela peut se propager dans la chaîne alimentaire.



FIGURE 1.3 – Ecosystèmes Marins, extrait du phénomène de Deep Water aux USA Extrait de [<https://ise.unige.ch/isdd/spip.php?article221>] consulté le 13 Janvier 2023

#### – *La pollution d'origine anthropique*

La pollution par les hydrocarbures d'origine naturelle est distincte de la pollution anthropique causée par des activités humaines telles que l'extraction, le transport maritime, les déversements accidentels et l'exploitation du pétrole brut. Ces activités peuvent également entraîner des déversements de pétrole dans l'environnement, mais sont souvent soumises à des réglementations et des responsabilités humaines. Les déversements accidentels d'hydrocarbures peuvent survenir lors du transport maritime, des opérations de forage pétrolier en mer comme dans le cadre de l'exploitation du champ pétrolier de Sangomar, des accidents lors du transfert de carburant, ou d'autres incidents liés aux installations pétrolières et gazières. Ces incidents engendrent ainsi des marées noires destructrices qui mettent à mal la faune et la flore marine comme dans le cas de l'évènement du "Depp Water" aux États-Unis (Hugo, 2021) (figure 1.4). Elles se produisent lorsque d'importantes quantités de pétrole sont libérées dans l'océan, formant une couche à la surface de l'eau qui peut se propager sur de vastes zones. La pollution due aux hydrocarbures d'origine anthropique est un problème environnemental sérieux qui nécessite une gestion attentive, une réglementation stricte et des efforts continus pour développer des pratiques plus durables dans l'industrie pétrolière et gazière.

### 1.3 *Présentation de la zone d'étude*

La petite côte du Sénégal où se situe l'Aire Marine Protégée (AMP) de Sangomar, s'étend de Hann aux îles du Saloum. L'un de ses traits caractéristiques est qu'elle présente une grande richesse géomorphologique et de biodiversité : cordons et flèches sableuses, falaises, baies, lagunes et estuaires à mangrove (cf figure 1.3) (Sakho, 2013). Il est important de mettre en exergue cette région car la proximité de réserves de pétrole situées à 60 milles nautiques (1 mille nautique = 1,852 km) au Sud de Dakar, sur la pente abrupte du plateau (à une profondeur d'environ 600 mètres), accroît considérablement la vulnérabilité de la région à d'éventuels déversements d'hydrocarbures.

La circulation au niveau de la Petite Côte sénégalaise, située au sud de Dakar, est influencée par divers facteurs parmi lesquels la circulation au niveau de la côte sénégalaise en général. Les alizés jouent un rôle important dans la circulation le long de la côte. Ces vents constants soufflant généralement de l'est vers l'ouest influencent les mouvements de l'eau le long de la Petite Côte. Comme pour la côte sénégalaise en général, la circulation le long de la Petite Côte peut varier au cours de l'année en raison des changements saisonniers dans la direction des vents.

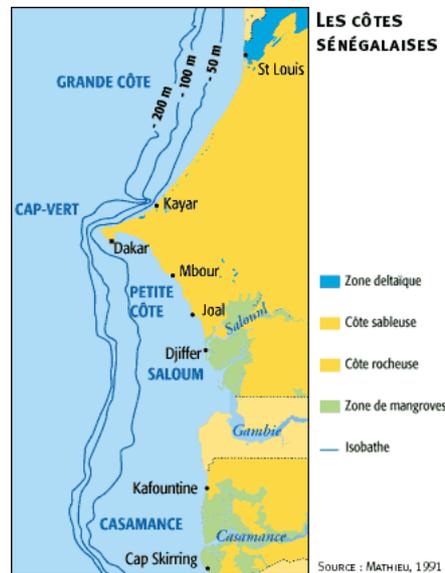


FIGURE 1.4 – Les côtes sénégalaises. Extrait de [<https://www.au-senegal.com/les-cotes-senegalaises,043.html>] consulté le 13 Décembre 2023

La zone d'exploitation pétrogazière de Sangomar se trouve au large des côtes du Sénégal, en Afrique de l'Ouest. Il s'agit d'une région maritime où des activités d'exploration et d'exploitation pétrolière et gazière sont menées. La zone est riche en ressources pétrolières et gazières, ce qui a conduit à des activités d'exploration intensive pour évaluer les réserves présentes. En raison de l'activité pétrogazière, des infrastructures telles que des plates-formes offshore, des installations de forage et des terminaux pétroliers et gaziers peuvent être présentes dans la zone. Ces installations soutiennent les opérations d'exploration, de production et de transport des hydrocarbures.

Le champ Sangomar (anciennement champ SNE) sera la première exploitation de pétrole du pays et est situé à 100 kilomètres au Sud de Dakar. La connaissance détaillée de la bathymétrie est cruciale pour l'industrie pétrogazière lors de la planification et de la mise en œuvre d'infrastructures offshore, telles que les plate-formes de forage et les installations de production.

La figure 1.5 représente la bathymétrie le long de la côte Sud du Sénégal mettant ainsi en exergue le champ pétrogazier, le point de l'ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) mais aussi l'AMP (Aire Marine Protégée) de Sangomar. Cette bathymétrie révèle des profondeurs variables, allant des zones côtières peu profondes aux zones plus profondes au large. La presqu'île du Cap-Vert joue le rôle de séparateur dans la zone maritime du Sénégal, créant ainsi deux régions distinctes en termes de topographie et de dynamique (Ndoye, 2016). Au Nord, le plateau est étroit (moins de 40 km), induisant un upwelling "classique" avec une remontée des eaux près de la côte. Dans la partie Sud, le plateau continental s'élargit et devient profond (environ 100 km), avec le talus continental qui s'incline vers l'Est jusqu'à la latitude 13°30' N (Sow, 2014), comme illustré dans la figure 1.5. En effet, les profondeurs marines au large des côtes sénégalaises présentent une inclinaison graduelle jusqu'à at-

teindre une profondeur d'environ 100 à 200 mètres. Au-delà de cette zone, la topographie marine prend la forme de la pente continentale, caractérisée par une augmentation rapide de la profondeur en direction de la plaine abyssale.

Le site de développement du champ pétrogazier de Sangomar est spécifiquement situé sur cette pente continentale, en eaux profondes, à des profondeurs allant de 700 à 1 400 mètres. Cette région est marquée par la présence de plusieurs canyons qui dévalent la pente continentale, dont l'un se trouve précisément dans la zone d'intérêt pour le développement du champ.

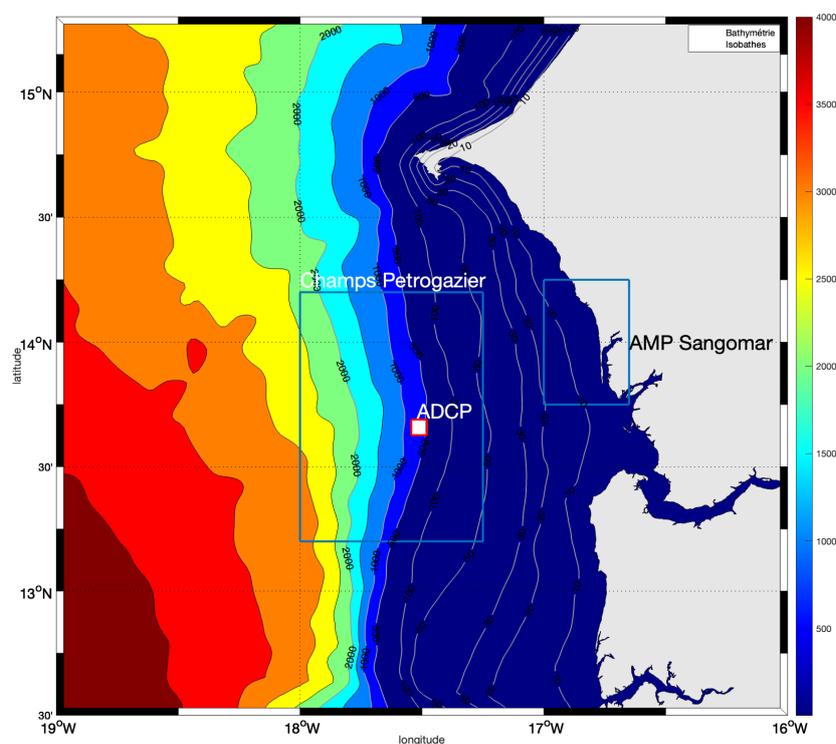


FIGURE 1.5 – Bathymétrie le long de la côte sud du Sénégal avec en carré blanc contour rouge, le point de mesure, le champs pétrogazier et l'AMP de Sangomar. Les données GEBCO 30" ont été utilisées pour produire cette carte de bathymétrie

## 1.4 Caractéristiques des réservoirs et retombés attendues

La stratégie envisagée pour le développement du champ SNE repose sur la mise en œuvre d'un système de production sous-marin, installé au fond, qui sera connecté à une Unité Flottante de Production, de Stockage et de Déchargement (FPSO) ancrée de manière permanente. Un FPSO est un navire spécialement conçu pour le traitement des hydrocarbures et le stockage du pétrole. Le FPSO traite les hydrocarbures à travers une série d'installations situées sur le pont qui séparent les différents fluides du pétrole brut. Le FPSO sera amarré en permanence au-dessus du champ sur des profondeurs d'eau d'environ 800 mètres. Le système d'amarrage est fixé à une tourelle sur la proue du navire, ce qui permet au FPSO de pivoter selon les conditions météorologiques et marines locales comme illustré dans la figure 1.6. Le FPSO dénommé Léopold Sédar Senghor mesure environ 300 mètres de long et jusqu'à 60 mètres de large. Le pétrole traité extrait du réservoir sera stocké dans les cuves de chargement du FPSO avant d'être acheminé vers des navires pétroliers d'extraction. Ces navires assureront le transport du pétrole vers des marchés locaux ou internationaux. Les activités en mer bénéficieront du support logistique et d'approvisionnement

d'une base opérationnelle établie au Port de Dakar (développement du champs SNE phase 1).

Les réserves pétrolières du champ sont emprisonnées dans des formations rocheuses, situées à une profondeur d'environ 2,5 km sous le plancher océanique. Ces formations, connues sous le nom de réservoirs ou champs, renferment un type de pétrole classifié comme "pétrole brut moyen". Cette classification indique que le pétrole du champ SNE se situe dans la catégorie médiane en termes de viscosité et de densité parmi les différents types de pétroles bruts. En effet, la classification des pétroles bruts en catégories telles que "léger", "moyen" et "lourd" est basée sur la densité API (American Petroleum Institute) du pétrole. Un pétrole brut léger a une densité API plus élevée, ce qui signifie qu'il est moins dense que l'eau, tandis qu'un pétrole brut lourd a une densité API plus basse, indiquant qu'il est plus dense que l'eau (développement du champ SNE phase 1). Le pétrole se trouvant au niveau du champ Sangomar présente une densité API élevée donc il semble être moins dense que l'eau d'où sa flottaison en cas de déversement accidentel ou de fuite.

Le champ SNE est projeté pour avoir une capacité de production maximale estimée entre 75 000 et 125 000 barils de pétrole par jour. Le FPSO aura une capacité de production d'environ 100 000 barils de pétrole brut par jour, ce qui générera des revenus qui contribueront à apporter des avantages économiques et sociaux durables à long terme au Sénégal. L'évaluation de ce gisement nécessite le forage de huit (8) puits et les réserves récupérables sont estimés à 630 millions de barils de pétrole. Le champ contient aussi du gaz mais bien que l'assurance concernant le marché du gaz et la conception technique ne soient pas encore assez solides pour une production économique de gaz vers le Sénégal, les installations sont planifiées de manière à le permettre dans le futur (Itie, Sénégal).



FIGURE 1.6 – Unité Flottante de Production, de Stockage et de Déchargement. Extrait de Itie, Sénégal, consulté le 16 Juin 2023.

Cette première partie est consacrée à l'étude de la circulation océanique générale et des particularités régionales. Nous avons exploré la dynamique océanique, en mettant particulièrement l'accent dans la région de la petite côte sénégalaise et le champ pétrogazier de Sangomar. En examinant les caractéristiques de la circulation océanique générale, ainsi que les particularités régionales telles que les courants de Guinée et le courant des Canaries, nous avons dressé une cartographie détaillée des forces marines qui exercent leur influence sur la région, mettant en lumière les dynamiques complexes et les interactions entre les différentes masses d'eau.

Cette première partie pose les bases pour une bonne compréhension de la dynamique océanique ainsi que les bases nécessaires pour évaluer l'impact potentiel de l'exploitation pétrogazière sur l'écosystème marin de la région de Sangomar. La deuxième partie qui suit correspond à la méthodologie utilisée et aux traitements des données.

# Chapitre 2

## Méthodologie

Dans cette section, les données *in situ* prises dans la zone d'exploitation du champ pétrogazier de Sangomar seront présentées en détail, suivi des données satellitaires recueillies, ensuite le modèle CROCO et le module lagrangien ROFF seront mis en exergue ainsi que la méthodologie adoptée dans ce travail.

### 2.1 *Présentation des différents types de données d'observations collectées dans la zone d'exploitation pétrolière SNE*

Les paramètres mesurés dans la zone d'exploitation mis à notre disposition tels que la température de surface, la salinité, la pression, la densité, la conductivité, la température de l'air, le vent et les courants, ainsi que les données satellitaires ont tous été traités au préalable et analysés dans ce travail.

- Les données de température de surface, de salinité, de pression, de densité, de conductivité..., ont été collectées lors de quatre (4) missions :
  - . le 24/03/2017 de 5h-06mn à 6h-59mn,
  - . le 22/06/2017 de 4h-58 mn à 6h-42 mn,
  - . le 22/06/2017 de 4h58mn à 6h59mn,
  - . le 27/06/2017 de 00h-41 mn à 1h-47mn.

Ces données, au niveau des stations LCM (Long Current Mooring) et WS (Wavescan) de la zone d'exploitation pétrolière de Sangomar, ont permis de faire une prise en main des outils de traitement de données pour la suite de notre stage. Néanmoins, vu la structure et le pas de temps des données, elles ne présentent pas assez d'intérêt pour comprendre leurs variations d'où le besoin de télécharger des données satellitaires pour mieux comprendre la variation spatio-temporelle de température de surface dans la zone.

- L'ensemble des données satellitaires disponibles en 2017 ont été téléchargées et traitées ([<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pls>]) sur toute la période 2017 pour étudier les variations de température de surface (SST) dans notre zone d'étude. L'instrument de mesure MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) est un

spectroradiomètre imageur embarqué à bord des satellites Aqua et Terra, lancés en décembre 1999 et mai 2002, respectivement. Son objectif principal est d'étudier la dynamique des éléments terrestres, tels que la terre, la glace et les océans. Un traitement dédié est appliqué aux données des satellites Aqua et Terra équipés de MODIS. Cette procédure couvre toutes les images, de jour comme de nuit durant l'année 2017.

- Les données de courants méridiens utilisées pour la validation du modèle ont été collectées sur le terrain en un point et à différentes profondeurs (0-80m), utilisant des instruments de mesure adaptés tels que des courantomètres placés au niveau du point de mesure ADCP (voir figure 2.1). Les données de courants couvrent une période significative des années 2017 et 2018 pour capturer les variations saisonnières et les conditions météorologiques changeantes. Ces données d'observations réelles des courants marins ont été comparées aux simulations avec du modèle CROCO (Coastal and Regional Ocean Community Model) pour effectuer une validation de celui-ci et avoir une idée de la fiabilité du modèle.

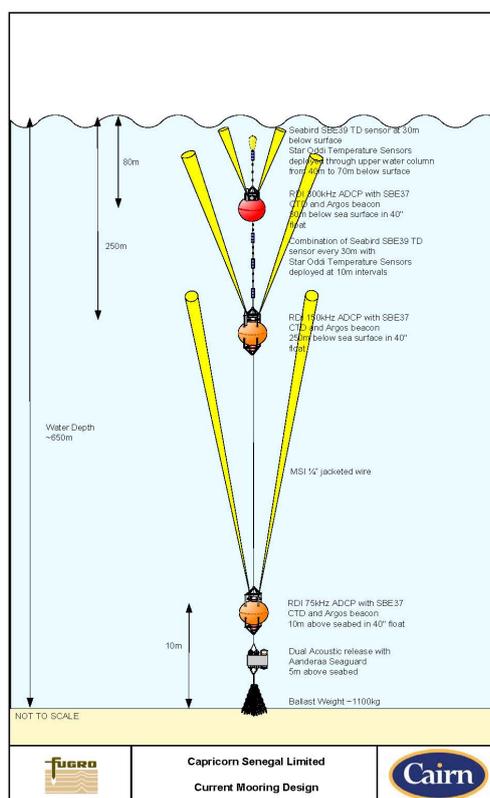


FIGURE 2.1 – Instrument de mesure du courant, extrait du rapport CAIRN

## 2.2 Les stations de mesure

Les stations de mesure au niveau du champ SNE jouent un rôle important dans la collecte de données essentielles pour surveiller et gérer les opérations pétrolières et gazières. Ces stations sont équipées de capteurs sophistiqués qui mesurent divers paramètres, tels que la pression, la température, la densité, les courants et les vents dans le milieu. Les sta-

tions de mesure dans notre zone sont au nombre de trois (3) (développement du champs SNE phase 1) :

- L’amarrage du LCM a été spécifiquement conçu pour recueillir un profil complet du courant dans la colonne d’eau, incluant les mesures à proximité du lit océanique. Ces mesures englobent non seulement les courants, mais aussi divers paramètres de l’eau de mer tels que la température, la pression..., assurant ainsi une évaluation approfondie de la dynamique marine. Cette station a été positionnée à une profondeur de 664m.
- Le dispositif de mouillage WS a été méthodiquement adapté pour recueillir des données sur les courants de la couche superficielle, les caractéristiques des vagues, la température de l’eau de mer, ainsi que les paramètres météorologiques tels que le vent, la pression atmosphérique, la température de l’air. Elle a été positionnée à une profondeur de 625m.
- Le point de l’ADCP qui a été conçu pour recueillir des données de courant en un point jusqu’à une profondeur de 780m, comme illustré dans la figure 2.2. Ces données recueillis ont été traité dans ce travail.

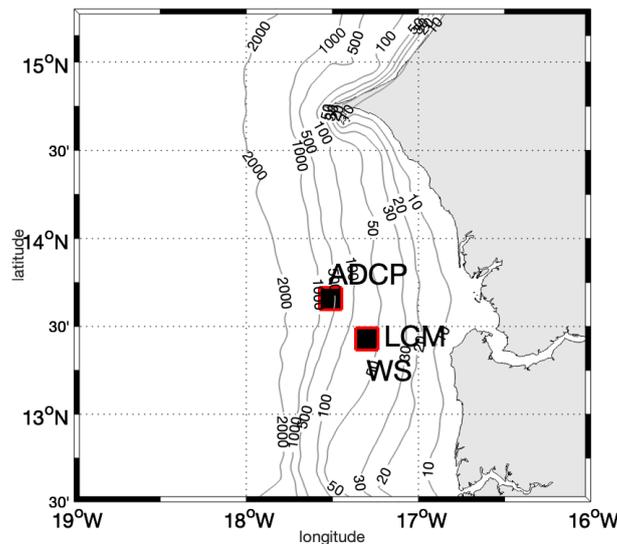


FIGURE 2.2 – Présentation des stations de mesure, les isobathes 10, 20, ...,2000 m sont représentées en contours gris

### 2.3 Présentation du modèle CROCO

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé les sorties du modèle hydrodynamique CROCO (Coastal and Regional Ocean Community model), la distribution des courants et la température de surface de la mer dans la région et plus particulièrement autour du champ d’exploitation pétrogazier de Sangomar. CROCO est utilisé pour simuler la circulation océanique régionale et côtière en utilisant des approches multi-échelles, idéalisées ou réalistes (Ndoye et al.,2016). Il est conçu pour étudier les phénomènes océaniques complexes le long des côtes et dans les régions marines spécifiques. CROCO est adapté pour modéliser des échelles spatiales relativement fines, ce qui le rend particulièrement utile pour les études côtières. Reconnu pour son efficacité à reproduire avec précision les phénomènes océaniques

complexes, CROCO a été configuré pour simuler divers paramètres tels que la température, les courants, la salinité et la densité de l'eau de mer et les paramètres dérivés (Sow,2014).

L'utilisation du modèle CROCO, a pour objectif de comprendre les mécanismes physiques liés à la circulation océanique. Des travaux antérieurs, tels que ceux de Caillaud et Dumas (2018) sur la validation du modèle CROCO, ont démontré sa capacité à reproduire avec précision des phénomènes complexes.

CROCO résout les équations de Navier-Stokes en 3D en considérant la force de Coriolis, les termes d'advection et le gradient de pression dans un référentiel en rotation couplées avec des équations d'advection/diffusion pour la température et la salinité, l'équation de continuité, et l'équation d'état de l'eau de mer. Des hypothèses telles que l'hydrostatique, l'approximation de Boussinesq, la décomposition de Reynolds, et l'isotropie de la turbulence horizontale sont intégrées pour représenter fidèlement la dynamique océanique (Caillaud et Dumas,2018).

En adoptant les coordonnées sigma ( $\sigma$ ) généralisées sur l'axe vertical, CROCO assure une représentation précise des interactions entre les courants et la topographie, permettant une simulation détaillée des processus liés à la bathymétrie et une meilleure représentation des phénomènes côtiers (Ndoye,2016).

Les équations primitives formulées en coordonnées cartésiennes guident la modélisation, prenant en compte les conditions hydrostatiques, l'approximation de Boussinesq, la méthode de Reynolds, et l'isotropie de la turbulence horizontale. Ces choix méthodologiques offrent une base solide pour une simulation océanographique précise de la région d'intérêt.

Comme illustré précédemment, il résout les équations primitives, à savoir les équations de Navier-Stokes dans un référentiel en rotation (equation 2.2), qui sont couplées avec des équations d'advection/diffusion pour la température et la salinité (equation 2.3). De plus, le modèle prend en compte l'équation de continuité (equation 2.5) et l'équation d'état de l'eau de mer de Jackett et McDougall (1995) (equation 2.6) sous les hypothèses spécifiées.

- Selon l'hypothèse hydrostatique, la pression en un emplacement donné résulte de l'épaisseur de la colonne d'eau au-dessus de cet endroit, tout en étant influencée par la stratification des eaux avoisinantes
- L'approximation de Boussinesq permet de considérer une densité constante, habituellement associée à la valeur la plus élevée dans la colonne d'eau, représentée par 0. Cette constante est appliquée de manière générale dans les équations, sauf aux endroits où l'influence du terme d'accélération gravitationnelle se manifeste, particulièrement à travers la relation hydrostatique.
- La méthode de Reynolds offre une solution pour représenter la turbulence en intégrant les concepts d'écoulement moyen, ainsi que les coefficients de viscosité turbulente  $K_v$  et de diffusivité turbulente  $K_c$ , permettant ainsi de clore le traitement de la turbulence dans le modèle.
- Selon l'hypothèse d'isotropie de la turbulence horizontale, les coefficients de viscosité turbulente horizontaux sont postulés comme étant identiques.

Sur l'axe vertical, le modèle CROCO adopte les coordonnées sigma ( $\sigma$ ) généralisées qui s'adaptent à la topographie pour résoudre de manière plus détaillée la dynamique à proximité des talus continentaux, assurant une représentation précise de l'interaction entre les courants et la topographie. Cette approche permet la reproduction précise des processus liés à la bathymétrie et affine la représentation des phénomènes côtiers (Ndoye,2016). Les équations primitives (c'est-à-dire les équations du mouvement sous les hypothèses énoncées précédemment), formulées en coordonnées cartésiennes, se présentent comme suit :

- Les équations de conservation de quantité de mouvement sur l'horizontale :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla u - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_u + D_u \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla v + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_v + D_v \quad (2.2)$$

- L'équation hydrostatique, qui prévaut en matière d'équilibre et qui gouverne la conservation de la quantité de mouvement sur l'axe vertical :

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (2.3)$$

- L'équation qui régit l'évolution du transport de traceurs  $C$  (salinité, température, traceurs passifs ...)

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla C = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_c \frac{\partial C}{\partial z} \right) + F_c + D_c \quad (2.4)$$

- l'équation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.5)$$

- Enfin l'équation d'état de Jackett et McDougall (1995).

$$\rho = \rho(T, S, z) \quad (2.6)$$

Avec  $u$ ,  $v$  et  $w$  représentant les composantes du vecteur vitesse  $\mathbf{U}$  dans l'espace tridimensionnel,  $P$  désignant la pression,  $D_u$ ,  $D_v$  et  $D_c$  faisant référence aux termes de dissipation turbulente sur l'horizontale,  $C$  étant un traceur tel que la température  $T$ , la salinité  $S$  ou un traceur passif, les termes  $F_u$ ,  $F_v$  et  $F_c$  représentent les termes de forçage. En parallèle,  $K_v$  et  $K_c$  sont les termes de viscosité et de diffusivité verticale turbulente.

Ces équations obéissent aux conditions aux limites suivantes en surface ( $z = \eta$ ) et au fond ( $z = -h$ ), avec  $h$  la profondeur de l'océan et  $\eta$  l'élévation de la surface libre par rapport au niveau de référence  $z = 0$ .

- À la surface de l'océan ( $z = \eta$ ) :

$$\begin{cases} K_v \frac{\partial u}{\partial z} = \tau_x^s \\ K_v \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_y^s \\ K_T^C \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q}{\rho_0 C_p} \\ K_S^C \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{(E-P)S}{\rho_0} \\ w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} \end{cases} \quad (2.7)$$

– À la surface de l’océan ( $z = 0$ )

$$\begin{cases} K_v \frac{\partial u}{\partial z} = \tau_x^s \\ K_v \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_y^s \\ K_T^C \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \\ K_S^C \frac{\partial S}{\partial z} = 0 \\ w = u(\partial x)h - v(\partial y)h \end{cases} \quad (2.8)$$

Avec :

- $\tau_x^s, \tau_y^s$  : les composantes de la tension visqueuse exercée par le vent sur la surface libre.
- $\tau_x^b, \tau_y^b$  : les composantes de la tension de fond paramétrisée par une friction linéaire avec  $r = 3.10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$
- $Q$  : le flux de chaleur net.
- $E - P$  : le flux net de masse en surface (bilan évaporation - précipitation).
- $K_v, K_T^C, K_S^C$  les coefficients turbulents de mélange vertical, comprenant la viscosité, la diffusivité thermique, et la diffusivité haline, sont évalués au sein de la colonne d’eau en utilisant le schéma de fermeture turbulente KPP (K-Profile Parametrization) développé par Large et al. (1994)

## 2.4 Présentation de la configuration

L’approche dans cette étude repose sur une configuration comprenant deux grilles. La première, de haute résolution (Sen2), englobe l’ensemble des côtes sénégalaises. Elle est imbriquée dans une seconde grille de résolution plus faible (Can10) qui couvre la région de l’Atlantique Nord-Est au large des côtes de l’Afrique de l’Ouest (voir figure 2.3). Les principales caractéristiques de ces grilles sont les suivantes :

- La grille "Can10" avec une résolution de  $1/12^\circ$  (environ 10 km) est dédiée à la résolution des phénomènes océaniques à moyenne échelle, en particulier les courants saisonniers. Elle englobe une zone allant de  $6^\circ \text{N}$  à  $35^\circ \text{N}$  en latitude et de  $6^\circ \text{W}$  à  $32^\circ \text{W}$  en longitude.
- La grille "Sen2" avec une résolution de  $1/60^\circ$  (environ 2 km) est spécifiquement conçue pour capturer la dynamique côtière à une échelle plus fine. Cette grille de haute résolution couvre l’ensemble du système d’upwelling sénégalais, s’étendant de  $12^\circ \text{N}$  à  $18^\circ \text{N}$  et de la côte à environ  $20^\circ \text{W}$ .

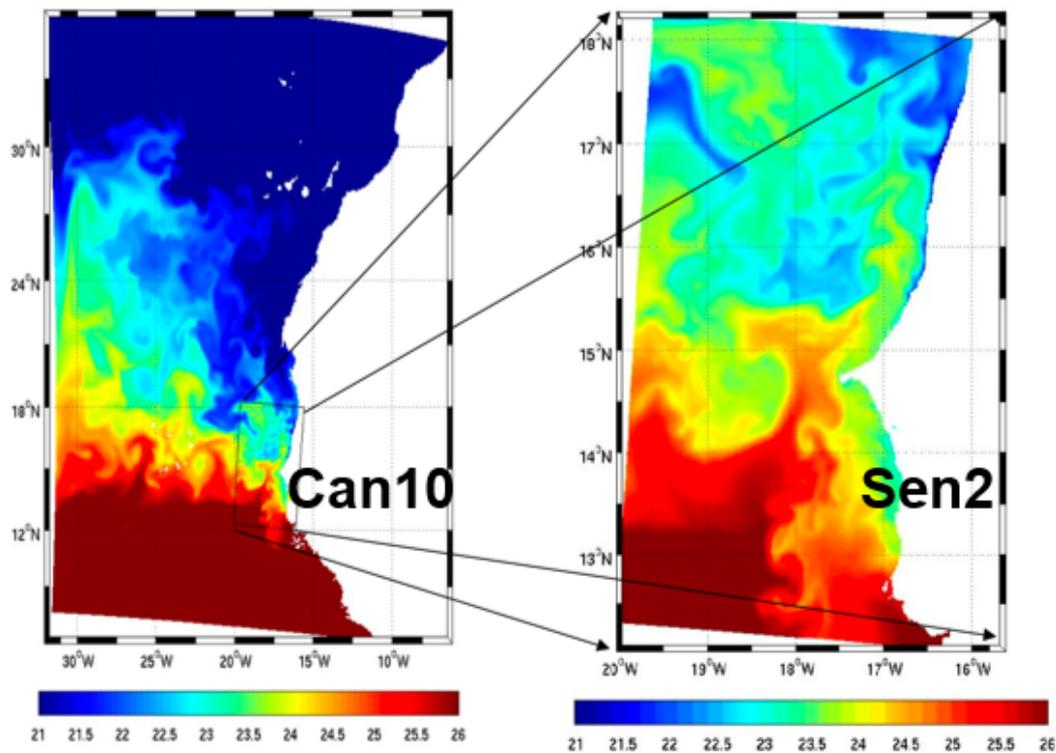


FIGURE 2.3 – Température de surface de la mer des deux grilles, (Ndoye, 2016)

Les paramètres et valeurs utilisés sont représentés dans le tableau ci-dessous :

TABLE 2.1 – Paramètres de la configuration des deux grilles (Ndoye, 2016)

Nom des deux grilles	Can 10	Sen 2
<b>Les Limites géographiques</b>	6 °N - 35 °N 6°W - 32°W	12 °N - 18 °N 15 °W - 20 °W
<b>Résolution horizontale</b>	-10 Km	-2 Km
<b>Résolution verticale</b>	50 niveaux	50 niveaux
<b>Points de grille</b>	225 * 290	201 * 302
<b>Paramètres temporels</b>	dt=600s dt fast=12s	dt=120s dt fast=2,4s

Le produit GLORYS (Global Ocean Reanalysis and Simulations) et le vent du satellite ASCAT (Advanced Scatterometer) ont été utilisés respectivement pour les forçages océaniques aux frontières (OBC) et les forçages atmosphériques.

Les équations du modèle susmentionné ne peuvent être résolues de manière analytique. Il faut donc utiliser des méthodes numériques pour intégrer les équations aux dérivées partielles, impliquant l'utilisation de schémas numériques qui exigent une discrétisation spatiale et temporelle. Les sorties du modèle (champs de vitesse) seront utilisées dans le module lagrangien ROFF pour étudier la position de chaque particule. Cette étape nous permettra de simuler les trajectoires des particules d'eau, complétant ainsi notre compréhension des interactions dans la région d'exploitation du champ pétrogazier de Sangomar.

## 2.5 Description du module lagrangien ROFF

Le module lagrangien a été utilisé en conjonction avec CROCO pour le suivi des particules dans l'environnement océanique. Ce module offre une compréhension approfondie des trajectoires des particules, permettant une évaluation précise de la dispersion potentielle des contaminants. Il a spécifiquement servi à simuler le déplacement des particules en lien avec d'éventuelles sources de pollution dans la région d'exploitation du champ pétrogazier de Sangomar. Le module ROFF (Roms OFFline Floats), a été créé puis modifié pour assurer sa compatibilité avec Roms-Agrif (Ndoye, 2016). Son rôle essentiel est de simuler les trajectoires des particules dans l'eau en se basant sur les champs de vitesse générés par le modèle CROCO. Notre méthode consiste à effectuer des lâchers de particules avec les sorties journalières issues des simulations de CROCO pour l'année 2017 par pas de temps de cinq (5) jours et de les suivre dans le temps et dans l'espace pendant quatre (4) mois (voir figure 2.4). La zone d'exploitation de Sangomar constitue notre zone de lâcher définissant ainsi une expérience où l'on récupère à chaque pas de temps, la position et la profondeur des particules.

Cette combinaison du modèle CROCO et du module ROFF offre une approche complète pour étudier la circulation océanique, ainsi que le suivi dans le temps des particules afin d'évaluer le risque de pollution marine.

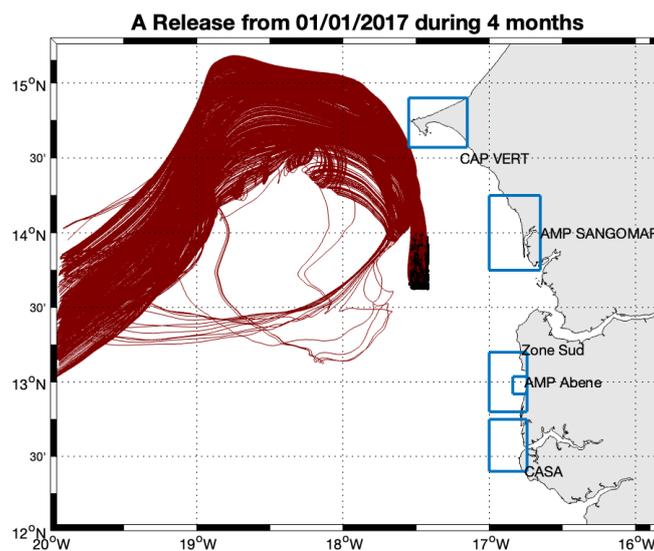


FIGURE 2.4 – Position des particules lâchées au niveau de la zone d'exploitation le 01/01/2017 de Sangomar.

## 2.6 Expériences

Nos expériences comprennent le lâcher de mille (1000) particules bloquées en surface préalablement fixées au niveau de la zone d'exploitation du champ pétrolier de Sangomar. En se concentrant sur la surface de l'océan, où le pétrole dans la zone présente une viscosité moyenne, favorisant ainsi sa flottaison, nous observons attentivement les trajectoires des particules. L'objectif est d'évaluer leur impact potentiel en cas de fuite ou de déversement accidentel dans la zone côtière du Sénégal. Cette approche met en lumière les possibles répercussions sur les aires marines protégées, en particulier sur l'AMP de Sangomar, l'AMP

d'Abéné, la région du Cap-Vert (Dakar), ainsi que la zone casamançaise plus au Sud. A la fin de notre simulations, on se retrouve avec 72 expériences pour toute l'année 2017 dont 6 expériences pour chaque mois.

Vu que le vent est un facteur dominant à la surface de l'océan, il serait important de considérer son impact sur le devenir des hydrocarbures, ce qui a incité à refaire d'autres simulations en prenant en compte l'effet du vent sur le déplacement des particules de surface (dérive de Stokes). Cette méthode consiste à ajouter un pourcentage de 3,5% du vent au niveau des courants de surface et de refaire les expériences lagrangiennes pour visualiser l'effet du vent sur les particules à la surface.

Dans ce chapitre dédié à la méthodologie, la présentation des données collectées dans la zone d'exploitation a été faite, couvrant des paramètres clés tels que la température, la salinité, la pression, la conductivité, la densité, le vent et les courants. Ces données fournissent une base essentielle pour notre étude de la circulation océanique dans la région du champ pétrogazier de Sangomar.

Nous avons également évalué la fiabilité du modèle CROCO en comparant les sorties du modèle aux données de courants et de vents collectées sur le terrain et des données de SST satellitaires. Cette démarche vise à assurer la validité des résultats obtenus par simulation et à renforcer la confiance dans l'utilisation du modèle CROCO pour notre analyse.

Les expériences avec le module ROFF (Roms Offline Floats) ont été une composante essentielle de notre méthodologie. En suivant les trajectoires de mille (1000) particules d'eau pendant une période de quatre mois, nous avons pu anticiper sur les éventuels impacts d'une fuite ou d'un déversement accidentel dans la zone côtière du Sénégal. Les zones d'impact, mises en évidence par ces expériences, englobent principalement les aires marines Protégées (AMP) et quelques zones côtières.

En somme, ce chapitre établit le socle de notre approche pour comprendre la circulation océanique et anticiper les implications environnementales éventuelles dans la région du champ pétrogazier de Sangomar.

# Chapitre 3

## Résultats et Discussion

Dans ce chapitre, il s'agit de faire une analyse approfondie des données météorologiques et océanographiques minutieusement recueillies et traitées dans la zone d'étude, puis d'évaluer la performance du modèle océanographique CROCO. Dans la seconde partie du chapitre, la caractérisation du devenir des masses d'eau et la détermination de leurs temps de transition seront effectuées. Enfin, la troisième partie de ce chapitre est consacrée à l'identification et la cartographie des zones exposées à la pollution marine. À travers une analyse détaillée en lien avec la circulation océanique, les zones exposées aux risques potentiels liés à l'exploitation pétrogazière seront identifiées.

### **3.1 Analyse des données météorologiques et océanographiques prises dans la zone d'exploitation pétrolière SNE**

#### **3.1.1 *La circulation océanique***

Dans cette section, la dynamique des courants marins dans la zone d'exploitation du champ pétrogazier de Sangomar sera étudiée pour les années 2017 et 2018. Ces données ont été recueillies lors de la mission 3 d'Avril à Juillet 2017 et de Février à Mai 2018. Les cartes générées (figures 3.1 et 3.2) à partir de ces données offrent une représentation spatio-temporelle des variations de courants, mettant en évidence les phénomènes océanographiques qui ont marqué ces années.

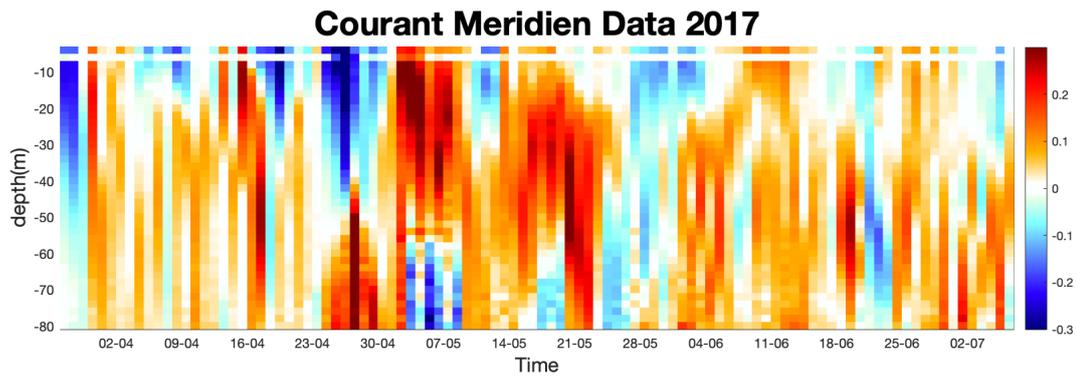


FIGURE 3.1 – Variation temporelle et verticale du courant méridien dans notre zone d'étude du 01/04 au 19/07 2017, mesuré par le mouillage de surface Wavescan

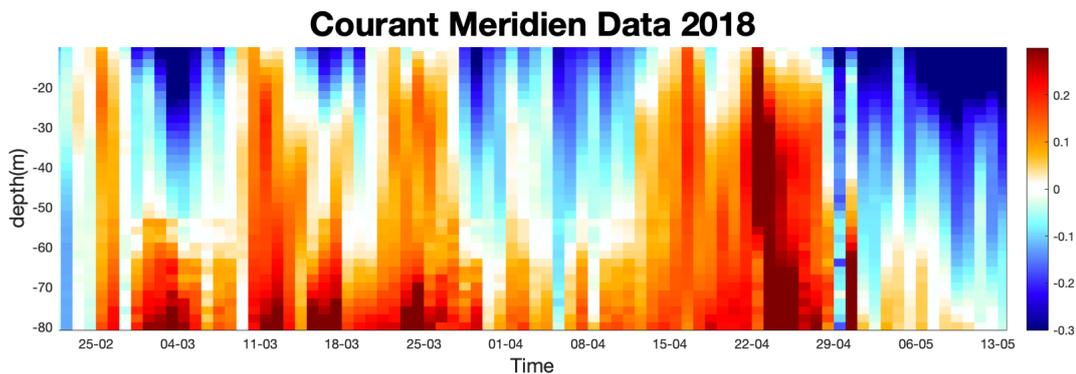


FIGURE 3.2 – Variation temporelle et verticale du courant méridien dans notre zone d'étude du 14/02 au 14/05 2018, mesuré par le mouillage de surface Wavescan

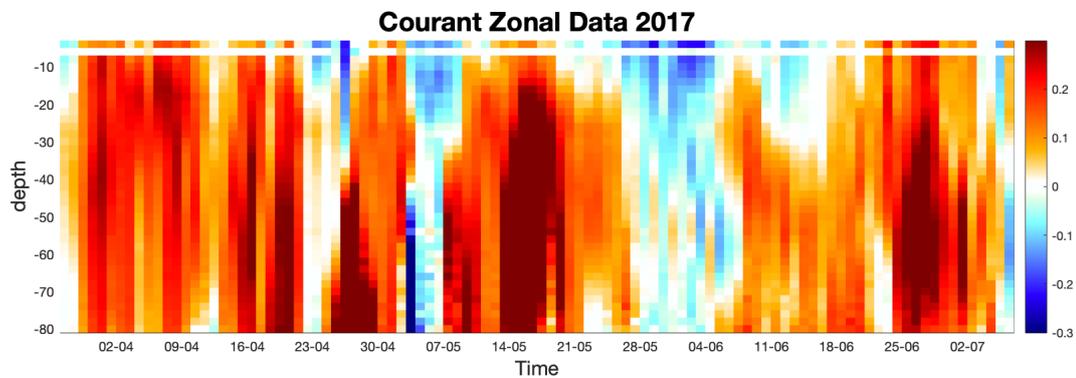


FIGURE 3.3 – Variation temporelle et verticale du courant méridien dans notre zone d'étude du 01/04 au 19/07 2017, mesuré par le mouillage de surface Wavescan

Les figures 3.1 et 3.2 montrent une alternance de courant venant du Nord (couleur rouge) et de courant venant du Sud (couleur bleue) dans les quatre vingt premiers mètres (80 m) de profondeur. Les mesures effectuées à WS ont été significativement influencées par les vents du Nord, générant un flux prédominant de Sud-Est dans la couche de surface. On note que les courants de surface varient principalement entre l'ouest et le sud-ouest (figure 3.3) pendant la saison sèche due aux alizés du Nord, tandis qu'ils s'orientent vers le nord et le nord-est pendant la saison humide marquée par présence de la mousson du Sud (figure 3.1). En ce qui concerne les courants situés en dessous, leur direction prédominante est vers le Nord-Ouest (figure 3.1, 3.2, 3.3). Les vitesses moyennes du courant enregistrées sur tous les sites ont présenté une variabilité, atteignant un maximum de 24 cm/s et un minimum de 6 cm/s, à des profondeurs respectives de 12,5 m et 80 m sous le niveau moyen

de la mer (cf figure 3.2). Le vent étant un facteur important dans la dynamique des courants de surface, nous avons également traité et exploité les données de vent.

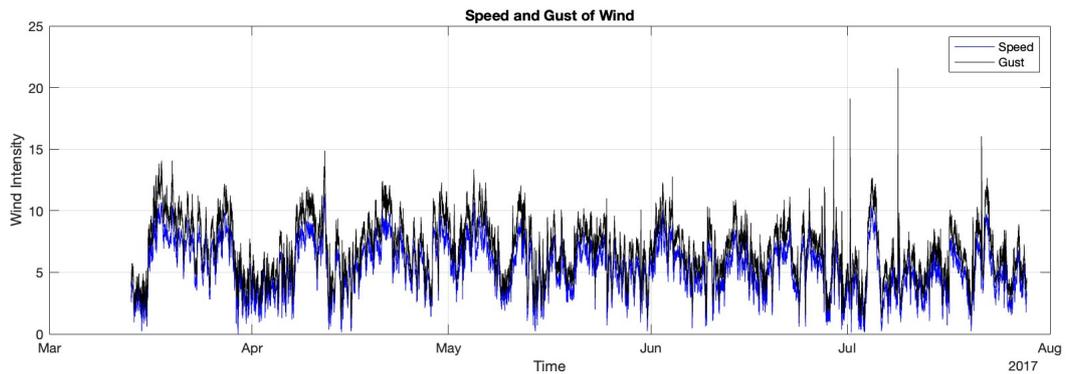


FIGURE 3.4 – Intensité du vent en bleu et des rafales en noir en 2017

La figure 3.4 représente l'intensité du vent de Mars à Août 2017 mesuré en un point. En effet, une rafale est, en un site donné, un renforcement brutal et passager du vent, qui se traduit par une hausse brève et soudaine de la vitesse instantanée du vent par rapport à sa vitesse moyenne. On observe des intensifications et des relaxations du vent et au mois de Juillet des pics allant jusqu'à 23 m/s. L'intensité du vent diminue au fur et à mesure que l'on s'approche de la saison des pluies en raison des changements saisonniers dans la circulation atmosphérique. Ceci est dû au retrait des alizés du Nord présent durant la saison sèche et à l'installation de la mousson du Sud annonçant la saison pluvieuse (Hassane, 2013). Les cartes de roses du vent de la figure 3.5 montrent que l'intensité du vent diminue en allant vers la saison des pluies. On note que la direction du vent est du Nord voir Nord-Est en hiver correspondant aux alizés continentaux ou harmattans provenant de la dépression saharienne et caractérisés par une sécheresse liée à son long parcours continental (Sow, 2014). Le vent s'intensifie vers le Nord-Ouest au printemps, issu des alizés maritimes de l'anticyclone des Açores. Enfin en été, avec la remontée de la mousson de secteur Sud-Ouest provenant de l'anticyclone de Sainte-Hélène, on observe une relaxation du vent due au retrait des alizés du Nord et à l'installation du flux de mousson (Hassane, 2013). Puis en Automne, on note la réapparition des alizés continentaux de secteur Nord-Est qui s'intensifient progressivement sur la grande côte et la petite côte du Sénégal avec une intensité moins importante et une variabilité faible (Sow, 2014).

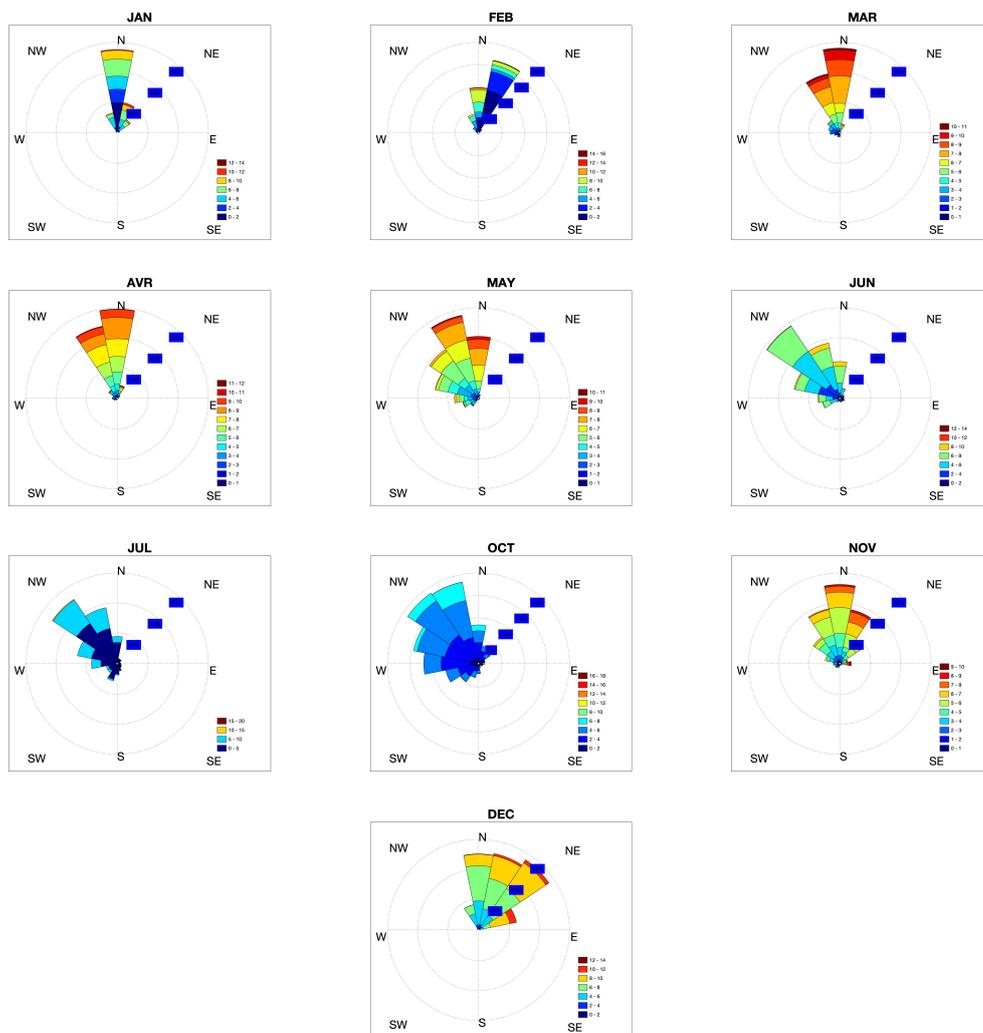


FIGURE 3.5 – Carte de rose des vents de 2017, mesuré par le mouillage de surface WS

### 3.1.2 Structure de la température de surface de la mer (SST)

L'examen approfondi de plus de 100 images de température de surface de la mer (SST) provenant du spectroradiomètre imageur MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), sur les côtes sénégalaises a permis d'élaborer les cartes températures de surface de la mer ci-dessous :

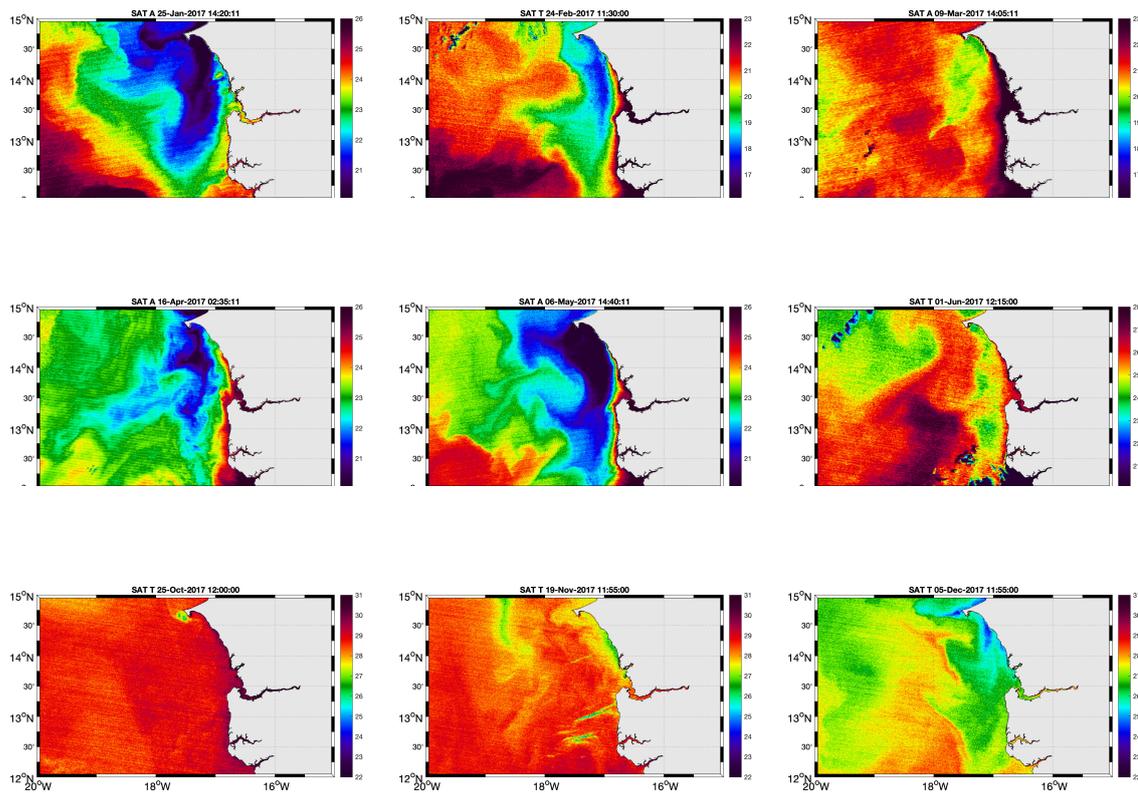


FIGURE 3.6 – Quelques cartes de SST journalières issues de toutes les données satellitaires disponibles en 2017. Pour chaque mois, une image de SST non impactée par les nuages et aérosols est choisie

On note qu'en début de saison (Octobre-Décembre), la remontée des eaux froides (upwelling) reste proche de la côte, mais à partir de janvier, la langue d'eau s'est déplacée vers le milieu du plateau continental coïncidant avec la réapparition du jet côtier et des alizés continentaux (Ndoye et al, 2014, 2017). La période centrale de l'upwelling se situe entre Février et Avril . Durant ces trois mois, les variations de la température de surface de la mer (SST) demeurent très limitées, et l'intensité du vent est maximale correspondant à l'intensification des alizés du Nord (Ndoye et al, 2014). En été, on assiste à un retrait de l'upwelling dû à la disparition progressive des alizés du nord et de l'apparition du flux de mousson.

En somme, le schéma annuel de variation de la température de surface de la mer peut être décrit de manière succincte comme une expansion de la zone d'upwelling, observée généralement d'octobre à novembre jusqu'en février, en corrélation avec l'augmentation progressive de la vitesse des vents (figure 3.6), suivie d'un retrait rapide de cette zone lorsque les vents diminuent rapidement à partir de juin (figure 3.6).

En synthèse, l'analyse approfondie des courants de surface, des courants de sub-surface, des vents à la surface dans la zone d'étude du champ pétrolier de Sangomar ainsi que la température de surface offre un aperçu détaillé de la circulation océanique locale. Les courants de surface, influencés par les vents dominants, présentent des variations saisonnières, tandis que les courants de sub-surface sont orientés vers le Nord. Les vents à la surface, notamment l'influence des alizés, jouent un rôle significatif dans la dynamique océanique (Sow, 2014) et influencent la variation de la température de surface favorisant les zones d'up-

welling (Ndoye et al,2016). Cette analyse de la circulation océanique constitue une base solide pour évaluer les risques potentiels liés à l'exploitation pétrolière dans la région. Néanmoins, il est impératif de confronter les données par le biais du modèle hydrodynamique CROCO permettant d'assurer une interprétation précise des phénomènes observés dans la zone d'étude.

## 3.2 *Evaluation du Modèle*

Dans le cadre de l'évaluation du modèle océanographique CROCO, nous avons examiné les courants dans la couche 0-80 mètres de profondeur ainsi que les températures de surface de la mer. Cette phase d'évaluation vise à confronter les simulations du modèle aux données *in situ*, offrant ainsi une évaluation critique de la capacité du modèle à reproduire de manière satisfaisante la dynamique océanique observée dans la zone d'étude du champ pétrolier de Sangomar. Les analyses qui suivent fourniront des perspectives détaillées sur la performance du modèle dans la reproduction des caractéristiques essentielles de la circulation océanique et des conditions thermiques de surface dans cette région spécifique. Les figures 3.7 et 3.8 représentent l'évaluation du courant méridien simulé par le modèle CROCO respectivement en 2017 et 2018.

Pour rappel, un courant méridien positif (couleur rouge) est dirigé vers le Nord alors que celui qui est négatif (couleur bleue) s'écoule vers le Sud. Le modèle arrive à reproduire le courant de surface en 2017 dirigé vers le sud au mois d'Avril et un peu en fin Mai ainsi que le sous courant dirigé vers le Nord vers le 07 Mai 2017 et le courant de surface du 11 Juin 2017. Par contre, la modèle sous-estime les courants sur toute la colonne d'eau du 18 Juin au 07 Juillet 2017. En 2018, sur une longue durée, le CROCO arrive à reproduire des courants de surface dirigés vers le Sud en Février, début Mars et Avril et sur toute la colonne d'eau en Mai, ainsi que les sous courants dirigés vers le nord en mi-Mars. Néanmoins, le modèle sous-estime les courants dirigés vers le Nord sur toute la colonne d'eau vers le 22 Avril 2018.

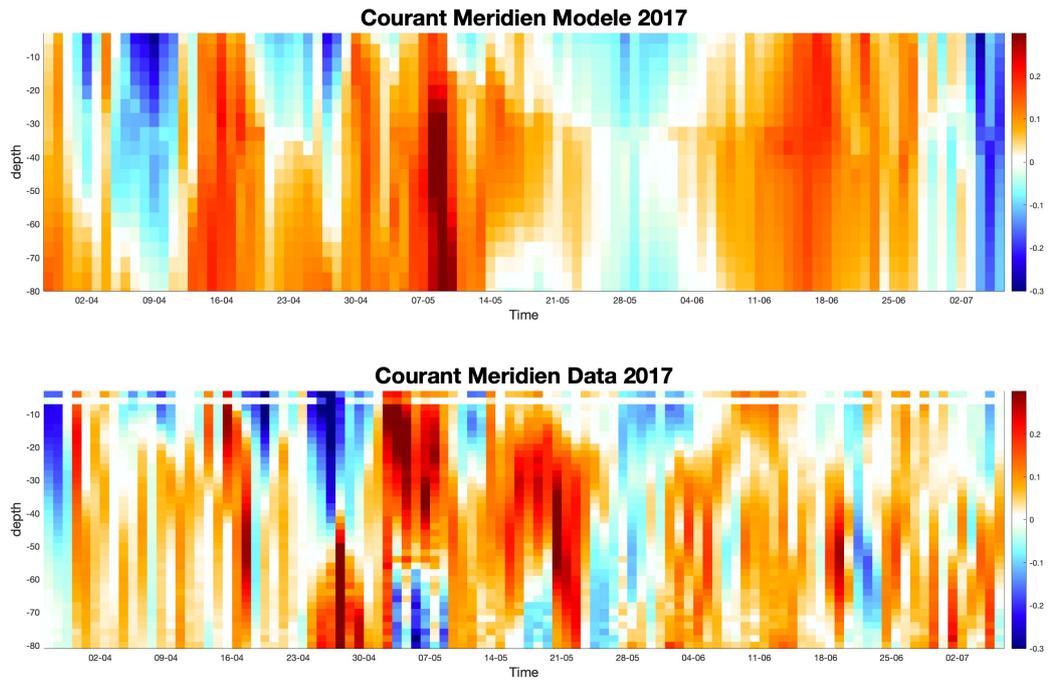


FIGURE 3.7 – Variation temporelle et verticale du courant méridien des données en haut et du modèle en bas en 2017

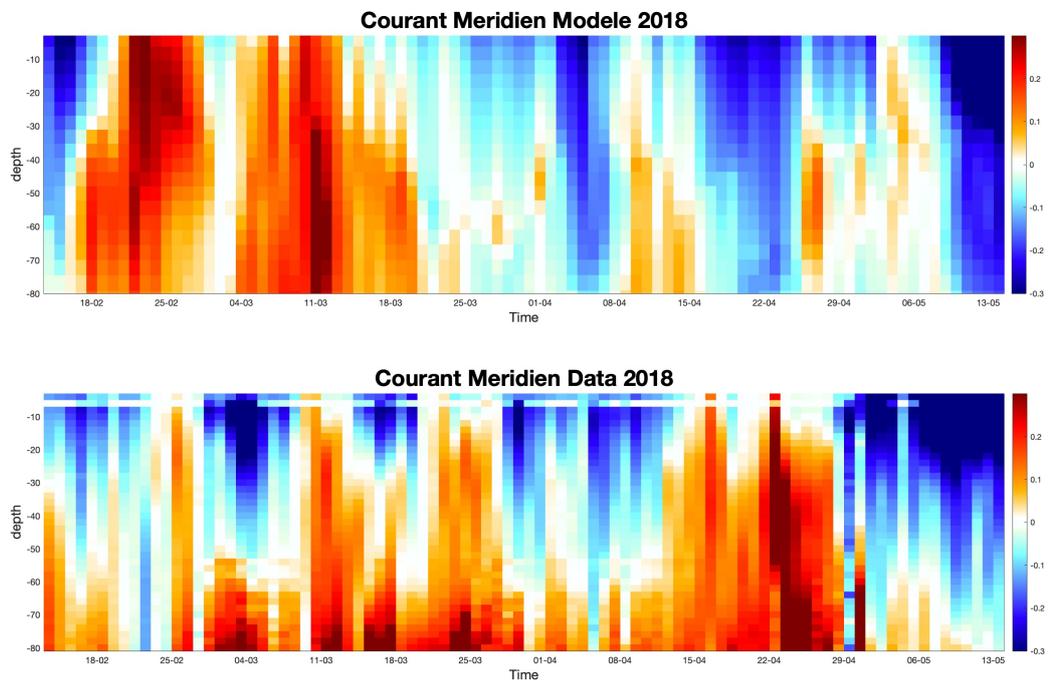


FIGURE 3.8 – Variation temporelle et verticale du courant méridien des données en haut et du modèle en bas en 2018

Il est important aussi de noter que CROCO a été validé dans plusieurs travaux antérieurs notamment ceux de Ndoye et al, 2017 ; 2018, Chabert et al, 2021, ce qui nous pousse à avoir une certaine confiance au modèle mais cela ne nous a pas empêché de l'évaluer

avec les données récentes collectées et utilisées dans ce travail. A cette évaluation du courant méridien s'ajoute celle des données satellitaires de la température de surface de la mer, confrontée aux données satellitaires de SST. Les figures 3.9 et 3.10 représentent la température de surface de la mer issue respectivement des observations satellitaires et du modèle CROCO. Le modèle arrive ainsi à reproduire la majeure partie des événements notés dans les observations à savoir la langue d'eau froide (la remontée au niveau de la côte) mais aussi les filaments qui séparent les différentes zones de température.

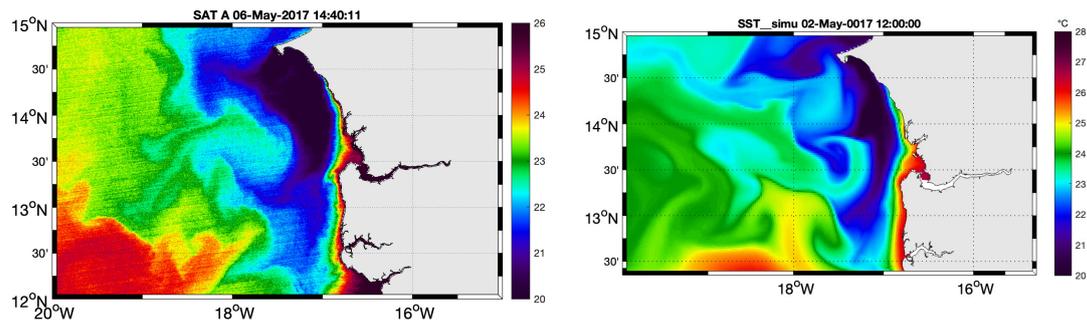


FIGURE 3.9 – Evaluation de la SST simulée par le modèle à partir des données satellitaires à gauche avec le modèle à droite pour le mois de Mai 2017

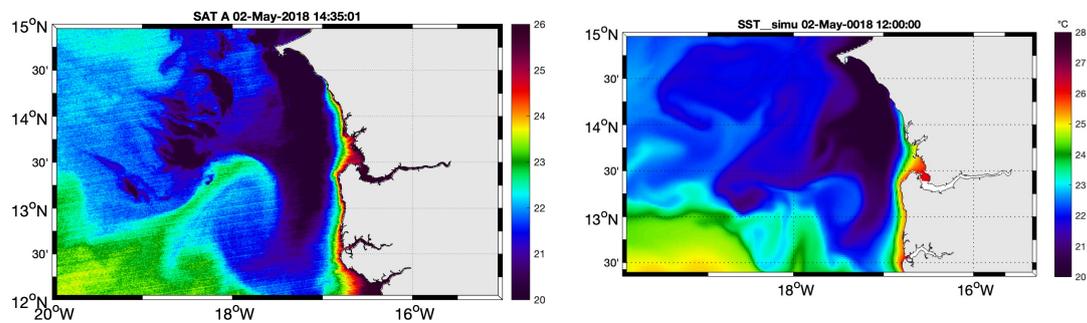


FIGURE 3.10 – Evaluation de la SST simulée par le modèle à partir des données satellitaires à gauche avec le modèle à droite pour le mois de Mai 2018

### 3.3 Les courants de surface du modèle

Le courant en surface durant les mois d'upwelling (Janvier,Février) sont de direction Nord-Sud favorisant l'apparition du jet côtier. Ceci est dû aux alizés du Nord qui soufflent à la surface de l'océan. Le mois de Mai qui est un mois de transition entre la saison sèche et la saison pluvieuse met en exergue la disparition progressive du jet côtier et l'apparition du flux de mousson (Sow,2014). Ce dernier s'installe au mois de Juin et se renforce au mois d'Août où l'on observe des courants dirigés vers le nord. Enfin en début Automne, le mois de Septembre se matérialise par le retrait de la mousson et la réapparition progressive des alizés du Nord.

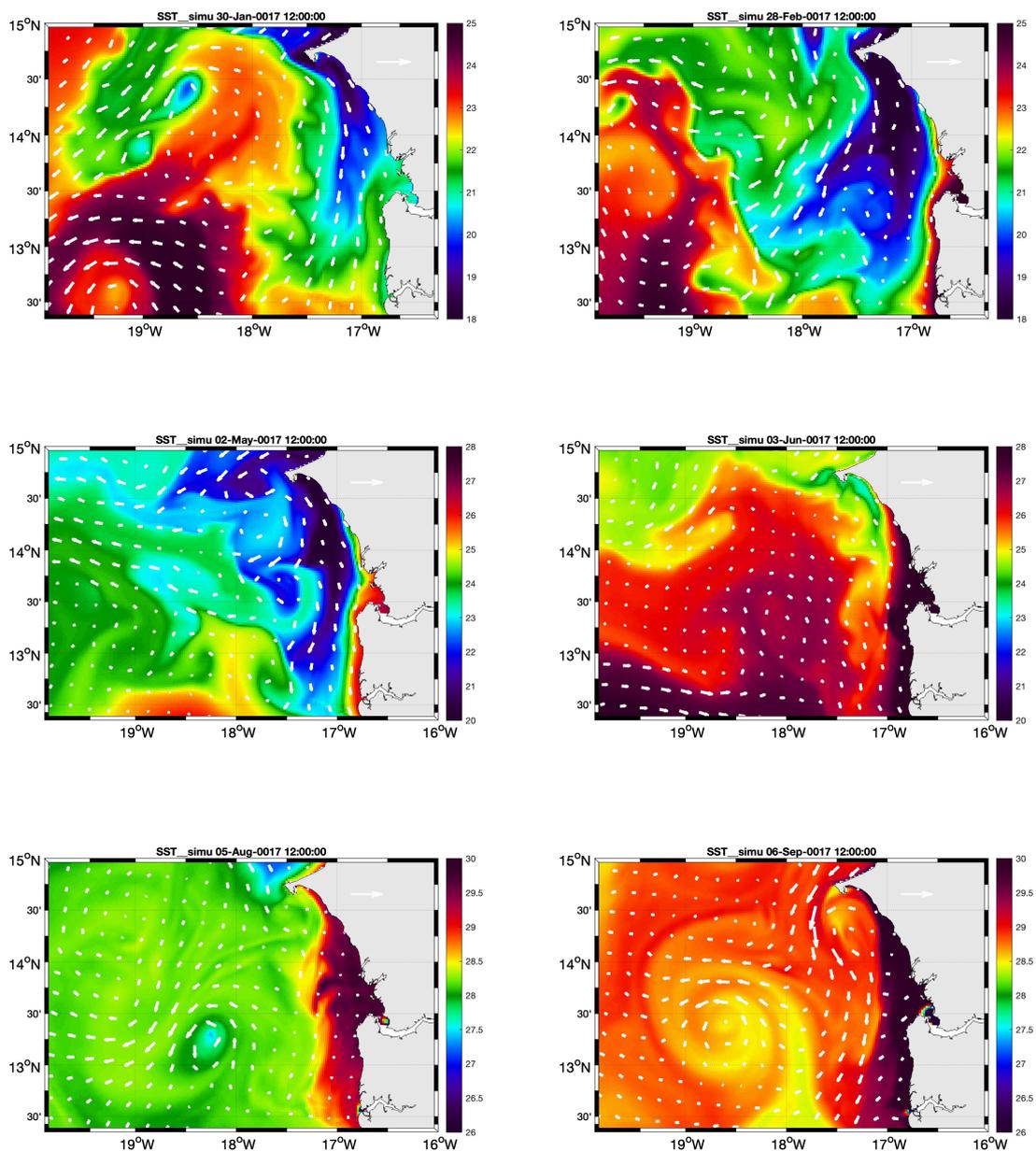


FIGURE 3.11 – Variations spatiales et temporelles des courants et de la température de surface. La SST est représentée en couleur et les courants par les flèches.

Il est important d'avoir un regard critique sur ces courants (figure 3.11) de surface car comme évoqué précédemment, le pétrole au niveau du champs Sangomar est peu visqueux, ce qui fait qu'en cas d'éruption ou de déversement accidentel, celui-ci flottera à la surface d'où l'importance de comprendre la dynamique océanique de surface.

En période froide (JFMAM), on peut noter qu'en cas de déversement du pétrole, la trajectoire des particules serait vers le large (figure 3.12), ramenées par le courant nord-équatorial atlantique (CNEA) vu la position du champs. En période chaude (JJAS), comme précisé précédemment, les courants viennent du Sud et on observe avec la position du champs (figure 3.12) que lors d'un déversement, les particules pourraient être ramenées vers la côte par les courants onshore (courant vers la côte).

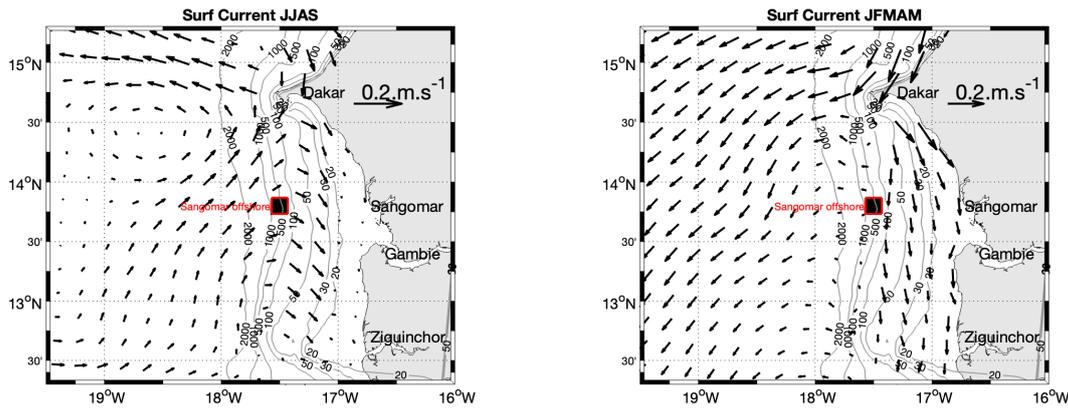
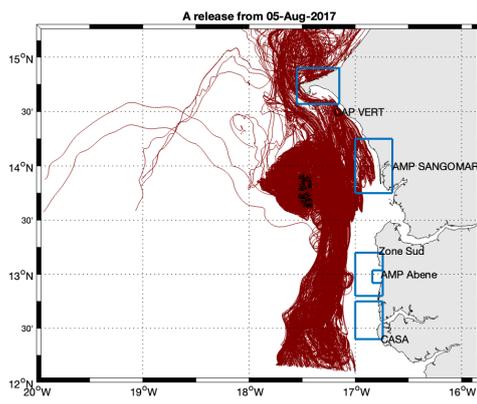
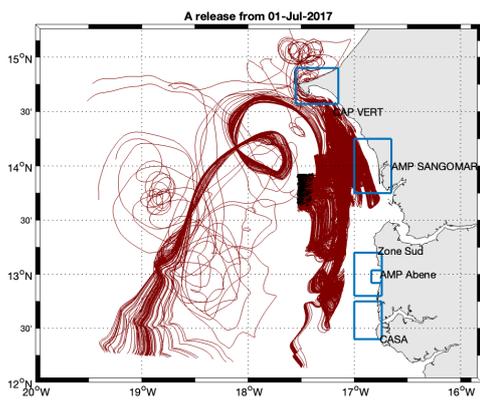
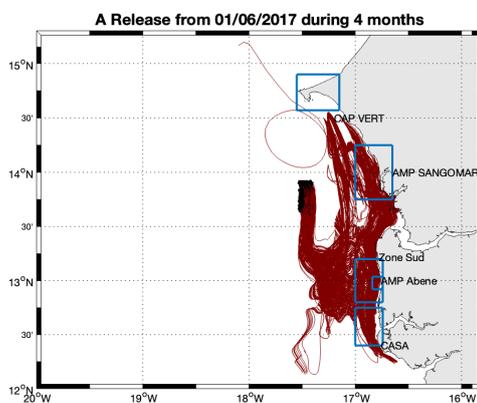
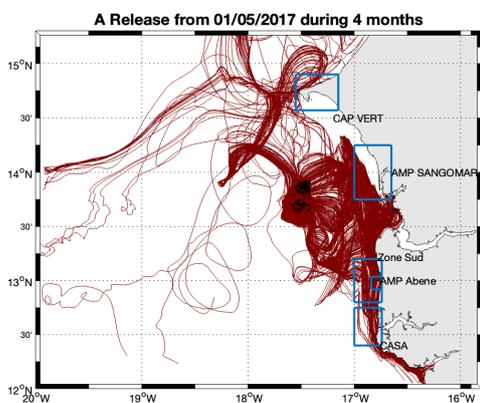
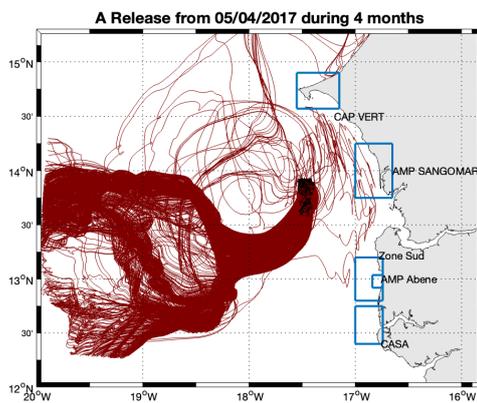
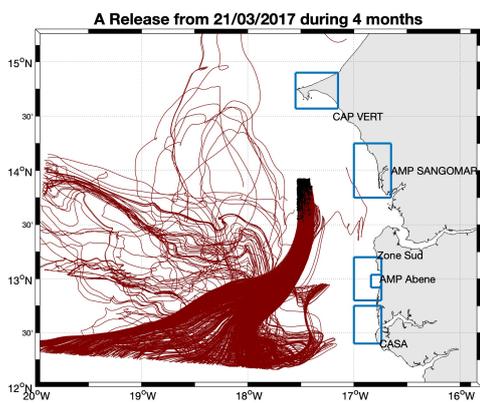
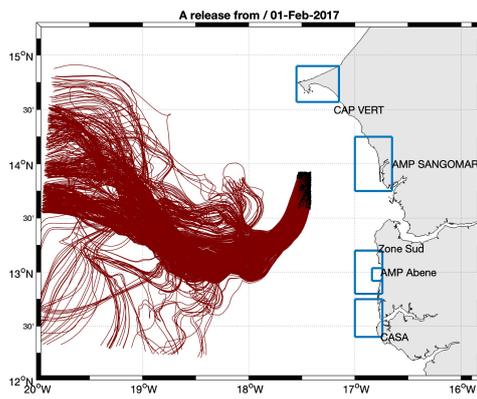
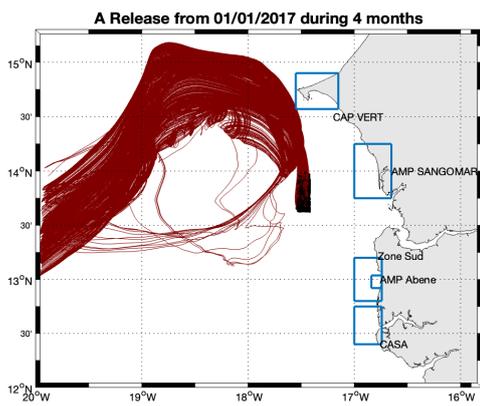


FIGURE 3.12 – Carte de courant de surface moyennée JJFMAM à droite et JJAS à gauche avec en carré noir le champs pétrolier

Pour étayer ces observations faites sur les courants de surface, la trajectoire des particules simulée avec le modèle ROFF a été tracée pour chaque mois par pas de 5 jours pour suivre l'évolution des particules dans le temps et dans l'espace.

### 3.4 Trajectoire des particules

Le parcours des particules dans le milieu océanique, tel que simulé par le module ROFF offre une fenêtre privilégiée sur la dispersion potentielle des éléments contaminants, soulignant l'importance de cette simulation pour appréhender les scénarios d'impact en cas de déversement accidentel.



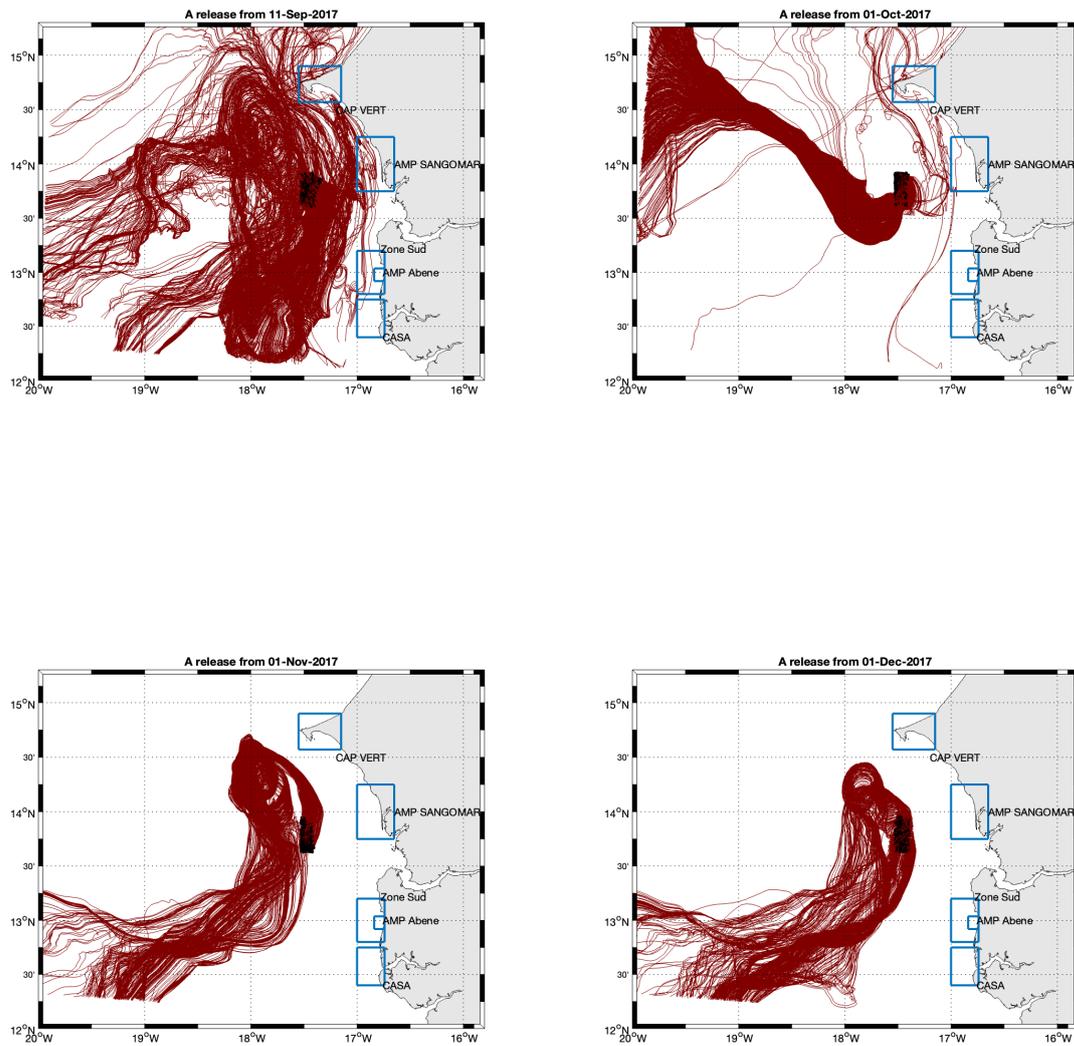


FIGURE 3.13 – Trajectoire (en rouge) de 1000 particules lâchées au niveau du champ pétrolier de Sangomar (tâche noire) durant toute l’année 2017

De Janvier à Avril, en cas d’éruption ou de déversement accidentel, il semble ne pas y avoir de pollution au niveau des côtes car durant cette période, les particules se dirigeront vers le large en suivant la direction du CNEA (figure 3.13). On observe quelques particules qui se dirigent vers la côte en Avril dû probablement au période de relaxation des allizés. Le mois de Mai est un mois de transition entre ces deux saisons et se matérialise par une pollution qui pourrait être importante sur toute la côte Sud (AMP de Sangomar, Zone Sud, AMP d’Abene et CASA) et aussi un peu au Nord vers Dakar. Certaines particules se dirigent vers le large car il y a toujours la présence des alizés du Nord. La période chaude, de Juin à Septembre est caractérisée par un risque élevé de pollution observée le long de la côte en raison de l’établissement de la mousson, un vent soufflant du sud vers le nord, combiné à des courants onshore qui transportent les particules vers le littoral. Enfin, d’Octobre à Décembre, avec l’installation des alizés et le retrait de la mousson (Sow, 2014), on assiste au phénomène évoqué précédemment où les particules se dirigent vers le large et ne risquent pas de polluer nos zones d’intérêt.

Après avoir examiné les expériences lagrangiennes et les implications potentielles sur l’exposition de la zone, une analyse des résultats à travers les histogrammes de décompte a été faite pour évaluer le nombre moyen de particules atteignant chaque zone spécifique.

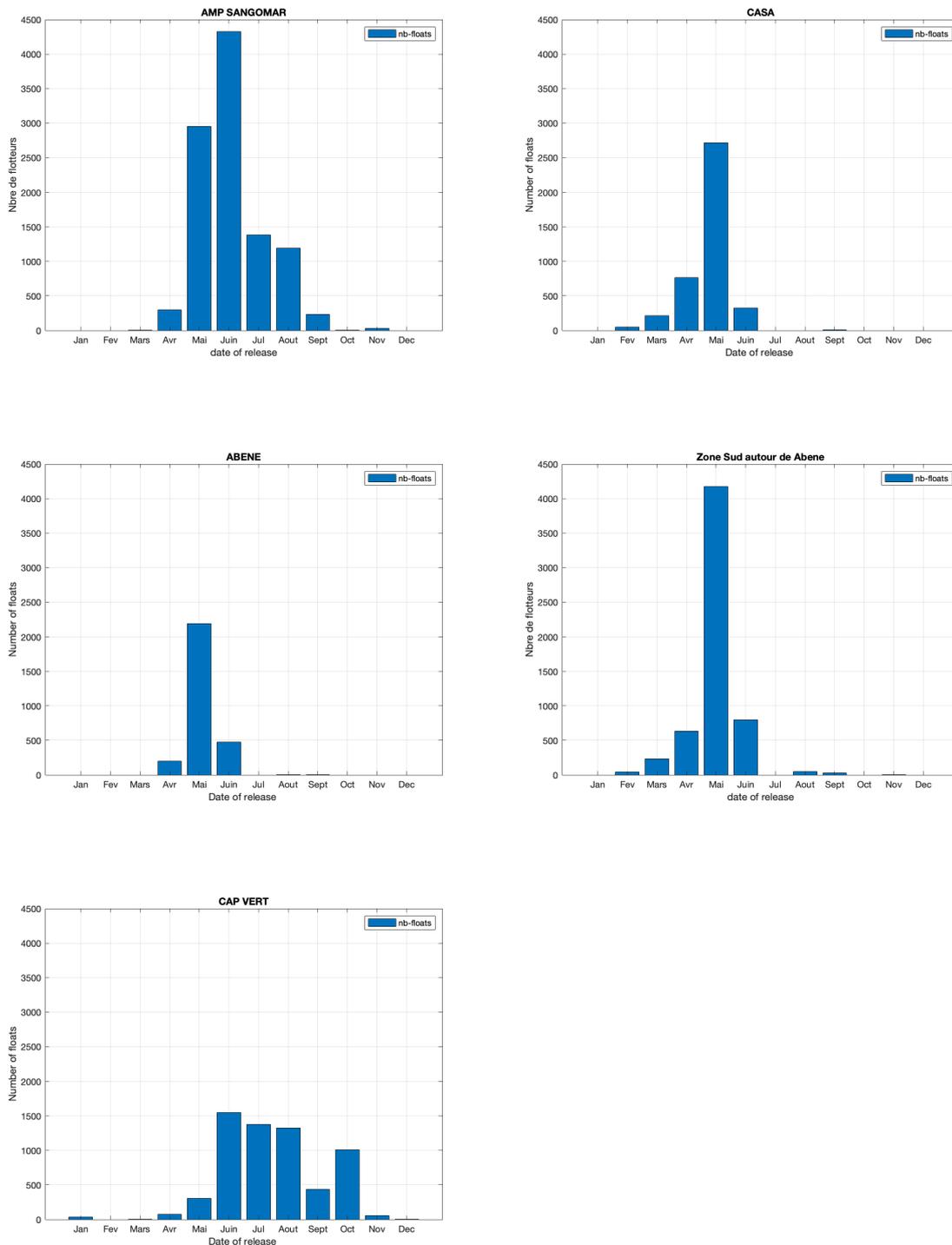


FIGURE 3.14 – Nombre de particules arrivant dans chaque zone d’intérêt durant toute l’année 2017

La figure 3.14 représente le nombre de particules qui arrivent dans chaque zone. Au total, pour chaque mois six mille (6000) particules ont été lâchées au niveau du champ pétrolier de Sangomar et ont été suivies pendant 120 jours. En basse Casamance, à Abéné et au niveau de la zone Sud (zone entourant l’AMP d’Abéné), on note des risques ou probabilités de pollution durant les mois d’Avril, Mai et Juin avec un pic au mois de Mai (mois de transition entre les deux saisons). Ce pic au mois de Mai peut être dû à l’installation de la mousson de secteur Sud qui est à l’origine de la bifurcation des courants vers la côte. En Casamance, le pic au mois de Mai compte près de 2719/6000 particules soit 45,31% de particules arrivant dans cette zone en 28 jours en moyenne. L’AMP d’Abéné reçoit près de 2189/6000 particules

au mois de Mai soit 36,48%' en 45 jours en moyenne. Ceci signifie qu'en cas déversement de pétrole au mois d'Avril et la zone d'Abéné pourrait être atteinte en 45 jours en moyenne. La zone Sud entourant cette AMP semble être la plus à risque dans cette région avec près de 4176/6000 particules au mois de Mai soit 69,6%' en 31 jours. Quant à l'AMP de Sangomar, elle demeure à risque en cas de déversement d'Avril à Septembre, sûrement dû à sa proximité avec le champ pétrolier et du fait que les courants onshore ramènent les particules (qui peuvent être des polluants) au niveau de la côte durant cette période (figure 3.14). Le pic au mois de Juin est marquée par l'arrivée de près de 4325/6000 particules soit 86,5%' en 36 jours. Enfin, la côte de Dakar et environ pourrait être polluée durant presque toute la période chaude et même en Octobre avec le retrait progressif de la mousson. Son pic a lieu en Juin avec près de 1547/6000 particules soit 27,78%' en 42 jours.

Au travers d'une approche lagrangienne, il a été démontré que la zone située à 60 miles nautiques (100 km) au Sud de Dakar, sur la rupture de pente du plateau (à une profondeur d'environ 600 mètres) (Ndoye et al, 2016), présente une vulnérabilité accrue à d'éventuels déversements d'hydrocarbures. Cette région, considérée depuis longtemps comme une zone de reproduction et de nurseries pour diverses espèces de petits poissons pélagiques, joue un rôle crucial dans l'écosystème marin (Ndoye et al., 2018). Il devient ainsi impératif de prendre en considération les enjeux environnementaux associés aux activités d'exploration et d'exploitation du gaz et du pétrole en offshore au large des côtes du Sénégal. À la lumière de ces éléments et de la compréhension de la circulation océanique dans la région sénégalaise, il est justifié de considérer l'ensemble du plateau interne et des estuaires comme des zones exposées face à l'exploitation des hydrocarbures.

En examinant les histogrammes de décompte des particules simulées, une tendance claire émerge quant à la trajectoire prédominante de ces particules à travers la zone d'étude. Les zones spécifiques, telles que l'AMP de Sangomar, l'AMP d'Abene et la zone environnante, la basse Casamance ainsi que la zone de Dakar, montrent des variations dans le nombre de particules qui y parviennent. Les résultats des expériences lagrangiennes révèlent des variations notables dans le nombre moyen de particules qui atteignent ces différentes zones définies de la région d'étude. Cette analyse permet de mettre en évidence les zones particulièrement impactées par les trajectoires des particules, offrant ainsi des informations cruciales pour évaluer les risques potentiels associés à d'éventuels déversements.

Pour approfondir notre compréhension des déplacements des particules, il est essentiel d'intégrer l'effet du vent (la dérive de Stokes). L'influence du vent sur la circulation de surface par la dérive de Stokes joue un rôle majeur dans le parcours des particules à la surface de l'océan.

### 3.5 *Dérive due au vent (dérive de Stokes)*

La dérive de Stokes, également connue sous le nom de dérive due au vent, est un phénomène océanographique qui reflète le déplacement horizontal des particules en réponse à l'action des vents dominants. Ce mécanisme prend en compte la force de Coriolis, les effets de la houle, et d'autres paramètres liés aux conditions météorologiques. En d'autres termes, la dérive de Stokes influence la trajectoire des particules à la surface de l'océan, ajoutant ainsi une dimension cruciale à la compréhension de leur dispersion dans la zone d'étude.

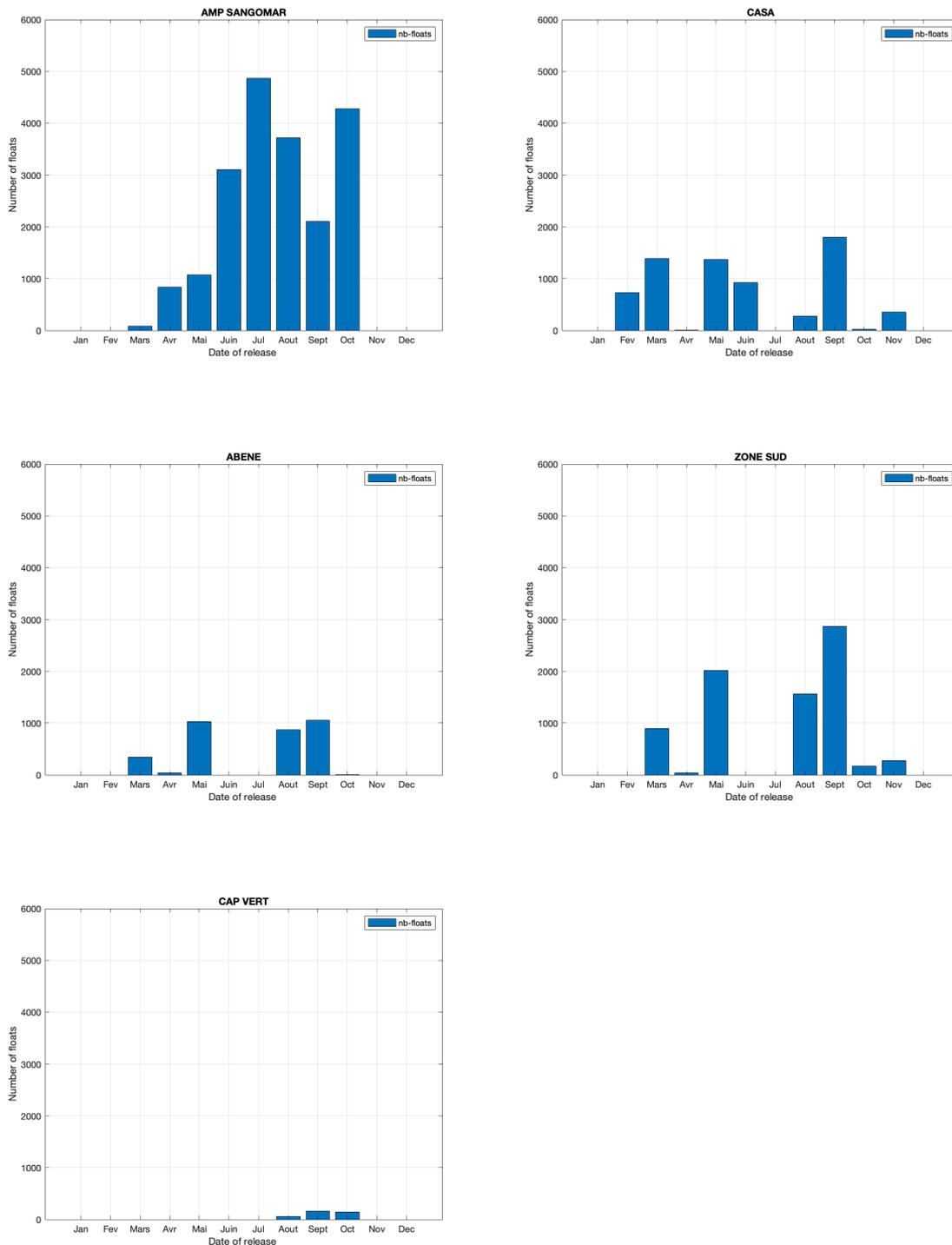


FIGURE 3.15 – Nombre de particules arrivant dans chaque zone d’intérêt durant toute l’année avec l’effet de la dérive de Stokes

L’effet de la dérive de Stokes, amplifié par les conditions météorologiques spécifiques, accentue la dispersion des particules par rapport aux expériences lagrangiennes sans la dérive. Cette augmentation de la dispersion peut être clairement observée dans la divergence des trajectoires, mettant en lumière l’influence de la dérive de Stokes sur le mouvement des particules dans la zone d’étude. La figure 3.15 montre que dans la partie Sud (CASA, ABENE et ZONE SUD), en février, mars et avril, la présence accrue de particules dans la zone sud pourrait être interprétée comme une conséquence directe de la dérive de Stokes amplifiée pendant cette période. Ces mois correspondent généralement à une intensification des vents dominants du nord (Sow,2014), contribuant ainsi à une dérive plus marquée

des particules à la surface de l'océan vers le Sud (figure 3.12). De Mai à Septembre, avec l'effet de la mousson de secteur sud-est, on assiste à une éventuelle pollution avec des pics au mois de Septembre (figure 3.15) qui matérialise le retrait progressif du flux de mousson qui disparaît carrément vers les mois d'Octobre-Novembre. Au niveau de l'AMP de Sangomar, on note une forte pollution durant toute la période chaude causée par l'installation de la mousson qui se renforce durant la saison pluvieuse avec la présence des courants onshore. Le pic est observé au mois de Juillet avec près de 4866/6000 particules soit 81,1%' en 6 jours. On constate nettement qu'avec l'effet du vent, la dispersion des particules s'accroît et devient plus rapide. Par contre, dans la zone cap-verdienne (Dakar), on ne note que 165/6000 particules soit 2,75%' en Septembre, ceci semble être dû au mouvement saisonnier du vent qui ramène les eaux du sud vers le nord durant la période de mousson et la région de Dakar se trouvant au Nord est toujours marquée par la présence des alizés de secteur Nord même s'ils sont de faibles intensités.

En résumé, l'analyse des trajectoires des particules en tenant compte de la dérive de Stokes offre des perspectives clés pour comprendre la dispersion des polluants dans la zone d'étude. La saisonnalité et les conditions météorologiques spécifiques jouent un rôle majeur dans l'ampleur de cet effet. La dérive de Stokes, en accentuant la dispersion des particules, souligne l'importance de considérer les facteurs atmosphériques dans l'évaluation des risques potentiels liés à la pollution marine, contribuant ainsi à une gestion plus précise et durable des zones côtières.

Après avoir exploré les trajectoires des particules et compris l'impact de la dérive de Stokes, l'attention se tourne maintenant vers la cartographie des zones les plus exposées à la pollution marine par les hydrocarbures dans notre région d'étude. Cette étape cruciale permettra de mieux appréhender les risques potentiels associés à l'exploitation pétrolière et d'éclairer les décisions en matière de préservation de l'environnement marin.

### ***3.6 Proposition d'une cartographie des zones exposées***

Dans cette section fondamentale de notre étude, l'attention est centrée sur la cartographie des zones exposées à la pollution marine dans la région du champ pétrolier de Sangomar en lien avec la circulation océanique. Cette cartographie revêt une importance capitale pour évaluer les conséquences potentielles de toute fuite ou déversement accidentel d'hydrocarbures dans ces eaux. En analysant attentivement les données météorologiques, océanographiques et les résultats de nos simulations, nous visons à identifier et à délimiter les zones présentant un risque accru de pollution. Cette démarche nous permettra au niveau des recommandations d'apporter des éléments essentiels à la protection des écosystèmes marins et des zones sensibles tout en contribuant à une gestion responsable des activités pétrolières dans la région.

La figure 3.16, montre qu'en période chaude, comme illustré précédemment, les zones côtières constituant le plateau continental où les activités marines sont beaucoup plus présentes sont principalement exposées à un déversement quelconque d'hydrocarbures. En effet, pour interpréter la cartographie des zones les plus exposées, il est essentiel de comprendre l'exposition inhérente à chacune des zones d'intérêt. Cette dernière est multifactorielle, prenant en compte divers paramètres environnementaux et écologiques spécifiques à chaque région. L'importance de chaque zone, telle que l'AMP de Sangomar, l'AMP d'Abene, la Zone Sud entourant cette AMP, la basse Casamance et la région de Dakar, dans la cartographie des zones vulnérables réside dans leurs caractéristiques uniques et leur rôle crucial dans l'équilibre écologique de la région. Chaque zone abrite des écosystèmes marins spécifiques, des espèces endémiques et des habitats sensibles (Ndoye et al, 2018). L'AMP de

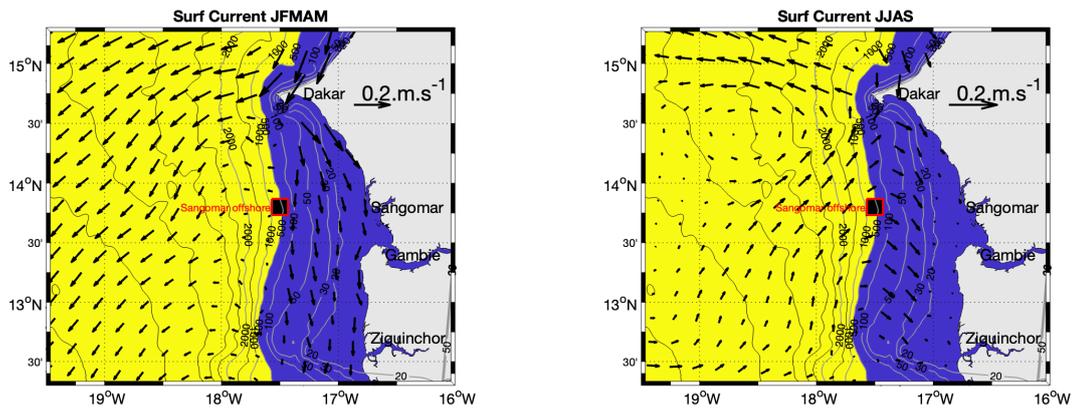


FIGURE 3.16 – Cartographie des zones exposées (en bleu) avec en flèches noirs les courants de surface moyens et en carré noir le champs pétrolier de Sangomar

Sangomar se distingue par son rôle crucial dans la préservation de la biodiversité marine et des mangroves, contribuant ainsi à la richesse écologique de la région. Les mangroves, écosystèmes côtiers complexes, jouent un rôle multifonctionnel en tant que nurseries pour de nombreuses espèces marines, habitats d'une grande diversité biologique et remparts naturels contre l'érosion côtière (figure 3.17).



FIGURE 3.17 – Zone Sangomar, habitat pour les petits pélagiques, source : [https://papaco.org/wp-content/uploads/2021/07/Gp1\\_EcosystemesDeltaSaloum.pdf](https://papaco.org/wp-content/uploads/2021/07/Gp1_EcosystemesDeltaSaloum.pdf), consulté le 26 Janvier 2024

En particulier, l'AMP de Sangomar abrite une variété d'espèces marines, allant des poissons aux crustacés en passant par les mollusques, qui trouvent refuge et conditions propices à leur reproduction dans ses eaux préservées. La présence de mangroves favorise la stabilité des écosystèmes marins, offrant des niches écologiques cruciales pour le cycle de vie de nombreuses espèces (Ngom, 2005). La protection de la biodiversité marine et des mangroves dans l'AMP de Sangomar revêt une importance capitale pour la durabilité environnementale de la région. Elle contribue à maintenir l'équilibre des écosystèmes côtiers, à assurer la pérennité des ressources marines et à soutenir les moyens de subsistance des communautés locales dépendantes de ces écosystèmes. Toutefois, ces écosystèmes demeurent vulnérables aux menaces environnementales, notamment celles liées aux risques potentiels de pollution marine, soulignant ainsi l'importance de la gestion et de la préservation continues de l'AMP de Sangomar.

Abene, avec ses particularités, pourrait être une zone clé pour la biodiversité marine comme

celle de Sangomar, elle est bourrée de mangroves qui luttent contre l'érosion côtière (Ngom,2005) et sert de lieux de ponte pour les tortues et d'habitats pour les crustacés (figure 3.18).



FIGURE 3.18 – AMP Abene, Mangroves, <https://www.alamyimages.fr/photos-images/mangrove-senegal.html?sortBy=relevant>, consulté le 26 Janvier 2024

La contamination de ces AMP pourrait entraîner la mort des mangroves ainsi que des poissons et des oiseaux migrateurs mais aussi le déplacement des habitants de cette région dû à la perte de ressources.

La zone Sud entourant l'AMP d'Abéné est identifiée comme une zone poissonneuse, une zone de fortes ressources en production primaire (figure 3.19) où l'activité de pêche est largement praticable (Mingou,2019).



FIGURE 3.19 – Zone Sud , Zone de pêche, <https://www.seneweb.com/news/pecheurs>, consulté le 28 Janvier 2024

L'importance de la riziculture en basse Casamance revêt une dimension socio-économique et environnementale cruciale pour la région. La riziculture, en tant que pratique agricole prédominante, joue un rôle essentiel dans la sécurité alimentaire des populations locales, fournissant une source de subsistance vitale. Les rizières constituent également des écosystèmes humides qui abritent une biodiversité spécifique et participent à la préservation des ressources en eau. Sur le plan socio-économique, la riziculture en Casamance contribue significativement aux moyens de subsistance des communautés locales(Manzelli et al,2015). Elle génère des emplois, stimule l'économie locale et renforce la résilience des populations face aux aléas climatiques. Une contamination de l'eau par des hydrocarbures pourrait avoir

des répercussions néfastes sur les cultures de riz, compromettant la sécurité alimentaire et l'économie locale. Par conséquent, la préservation de la riziculture en Casamance revêt une importance stratégique pour le bien-être des communautés locales et la durabilité environnementale de la région.

La préservation de la zone côtière de Dakar revêt également une importance sociale, car elle affecte la qualité de vie des communautés locales qui dépendent des ressources marines et de la beauté naturelle de la côte qui est largement fréquentée surtout en été. La sensibilisation, la planification urbaine durable et la mise en œuvre de pratiques respectueuses de l'environnement sont essentielles pour minimiser les impacts négatifs et promouvoir la résilience de cette zone côtière face aux défis actuels et futurs.

La cartographie des zones exposées (figure 3.16) constitue un outil essentiel pour évaluer et comprendre les risques potentiels liés à l'exploitation pétrolière dans la région étudiée. En synthétisant les données météorologiques, océanographiques et les trajectoires des particules, cette approche permet de visualiser les zones clés exposées aux impacts d'un éventuel déversement d'hydrocarbures. L'identification des aires marines protégées (AMP) telles que Sangomar, Abene, la zone côtière de Dakar, la Casamance et la zone Sud souligne l'importance de cibler les efforts de préservation et de gestion environnementale. Chaque zone présente des caractéristiques spécifiques et des enjeux particuliers, nécessitant des stratégies adaptées. En considérant l'exposition des zones d'intérêt, cette cartographie offre une base solide pour orienter les décisions de gestion et les politiques environnementales. Elle met en lumière l'importance cruciale de protéger les écosystèmes marins, les habitats côtiers et la biodiversité dans ces zones clés. Cette démarche, intégrant des données précises et une analyse approfondie, contribue à renforcer la résilience des écosystèmes côtiers face aux pressions anthropiques et aux éventuels incidents liés à l'exploitation pétrolière.

Après avoir identifié les zones les plus exposées, il est essentiel de passer à la phase d'actions en mettant en œuvre des recommandations concrètes ci-dessous visant à préserver ces écosystèmes marins précieux et une gestion durable des activités d'exploitation du champ pétrolier de Sangomar.

En somme, l'analyse approfondie des données météorologiques, océanographiques et des trajectoires des particules offre un aperçu détaillé de la circulation océanique dans la zone d'étude du champ pétrolier de Sangomar. Les résultats obtenus, couplés à la cartographie des zones exposées, constituent une base solide pour évaluer les risques potentiels liés à l'exploitation pétrolière dans la région. Ensuite, les acquis de notre étude ont été consolidés par le modèle CROCO, en considérant les données in situ, et en mettant en lumière la précision de nos simulations par rapport aux observations. Cette évaluation, couvrant divers aspects tels que les courants, la température de surface, et la dispersion des particules, renforce la robustesse de notre approche. Enfin, une étude exhaustive englobant les expériences lagrangiennes, l'analyse de la dérive de Stokes, la cartographie des zones exposées, et les recommandations, fournit ci-dessous une vision holistique de la circulation océanique dans la zone du champ pétrolier de Sangomar. Les résultats obtenus, enrichis par la compréhension des trajectoires des particules, contribuent à éclairer les risques potentiels liés à l'exploitation pétrolière et soulignent l'importance des différentes zones d'intérêt.

# CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'exploitation du champs pétrogazier de Sangomar et la préservation de l'environnement marin et côtier sénégalais. Il cherche à approfondir notre compréhension de la circulation océanique et des processus associés dans la zone d'exploitation pétrolière de Sangomar, au large des côtes sénégalaises en se basant sur l'intégration de données *in-situ* météorologiques, océanographiques et l'application de modèles numériques tels que CROCO et ROFF ainsi que l'exploration de divers aspects de la dynamique océanique.

Cette étude approfondie sur la caractérisation et l'évaluation des risques de pollution marine dans le contexte de l'exploitation du champ pétrolier de Sangomar, offre un aperçu détaillé de la dynamique océanique régionale et de sa saisonnalité, notamment à travers l'identification des courants d'upwelling en saison sèche et des phénomènes associés en saison pluvieuse. L'analyse des observations *in-situ* montre une forte saisonnalité des courants influencée par les vents du Nord durant la saison sèche (alizés). Le vent, étant un facteur important dans la dynamique des courants de surface, les observations montrent des intensifications et des relaxations du vent sur une longue période. L'évaluation du modèle CROCO par rapport aux données de courants et de température de surface de la mer (SST) a renforcé notre confiance en sa capacité à représenter la dynamique océanique locale. Le module lagrangien ROFF a permis de suivre la trajectoire des polluants lâchés au niveau de la zone d'exploitation pétrolière. Les résultats obtenus avec ce module, basés sur les sorties du modèle CROCO, mettent en lumière l'exposition des zones côtières aux risques de pollution, en particulier pendant la période d'hivernage (JJAS), caractérisée par la mousson de secteur sud et la formation de courants onshores vers la côte (Sow, 2014). Cette analyse souligne les probabilités de pollution des zones d'intérêt, en particulier du plateau continental, qui se révèlent être les zones les plus sensibles à la pollution marine liée à l'exploitation du champ pétrolier de Sangomar.

La cartographie des zones les plus exposées fournit des informations clés pour les décideurs en matière de gestion environnementale et de développement durable. Elle offre des orientations stratégiques pour la préservation des écosystèmes marins et l'élaboration de politiques de conservation dans la région. Cette étude transcende ainsi le cadre de la recherche scientifique pour souligner l'importance capitale de concilier développement économique et protection de l'environnement marin. Dans un contexte où la diversification énergétique est au cœur des enjeux, il devient impératif d'assumer collectivement la responsabilité de la santé de nos océans.

Cette étude ouvre la voie à des pistes de recherche novatrices pour une meilleure compréhension et gestion des écosystèmes marins dans la zone d'exploitation pétrolière de Sangomar. Parmi ces pistes, il convient de souligner :

- **Développement d'une nouvelle configuration du modèle CROCO** : Affiner et améliorer le modèle CROCO pour une représentation encore plus précise de la circu-

lation océanique locale. Cela pourrait inclure l'intégration de données en temps réel pour une validation continue.

- **Mise en place d'une plateforme d'observation** : Fournir d'avantage de données sur une longue période pour permettre de mieux comprendre la saisonnalité de plusieurs phénomènes océaniques.
- **Etude de scénarios extrêmes** : Notamment la dispersion des particules en cas de conditions météorologiques sévères, telles que de fortes houles ou des vents violents.
- **Utilisation d'un module de pétrole** : L'utilisation d'un module dédié à la modélisation de la trajectoire des particules de pétrole, prenant en compte toutes les spécificités de ce polluant, afin d'améliorer la précision des prévisions en cas de déversement accidentel.

Ces perspectives s'inscrivent dans une démarche dynamique visant à favoriser la durabilité et la préservation des écosystèmes marins dans la zone d'étude. Elles encouragent une collaboration continue entre la communauté scientifique, les décideurs politiques et les acteurs de l'industrie pour une gestion responsable et éclairée des ressources marines.

## ***Recommandations***

Pour préserver les zones d'intérêt identifiées, plusieurs recommandations peuvent être formulées :

- **Renforcement de la surveillance maritime** : Mettre en place des systèmes de surveillance maritimes efficaces pour détecter rapidement tout déversement d'hydrocarbures ou toute activité suspecte dans les zones sensibles. Cela peut impliquer l'utilisation de technologies modernes telles que la surveillance par satellite et les drones (Pantelodimou,2013).
- **Élaboration et mise en œuvre de plans d'intervention d'urgence** : Établir des plans d'intervention d'urgence spécifiques à chaque zone d'intérêt, en collaboration avec les autorités locales, les communautés et les parties prenantes. Ces plans devraient inclure des protocoles détaillés pour la gestion des incidents et la minimisation des dommages environnementaux.
- **Renforcement des capacités locales** : Former les communautés locales, les autorités régionales et les acteurs impliqués dans la gestion des aires marines protégées. Renforcer leurs capacités pour une meilleure surveillance, réaction rapide en cas d'incident et gestion durable des ressources marines.
- **Suivi environnemental continu** : Mettre en place un programme de suivi environnemental continu pour évaluer les impacts potentiels de l'exploitation pétrolière sur la biodiversité marine, les mangroves et les écosystèmes côtiers.
- **Engagement communautaire** : Impliquer activement les communautés locales dans les initiatives de préservation, en les sensibilisant aux enjeux environnementaux et en les intégrant dans les processus décisionnels.

---

Ces recommandations, combinées à une gouvernance efficace et à une collaboration étroite entre les parties prenantes, pourront contribuer à préserver ces zones d'intérêt et à assurer la durabilité des écosystèmes marins dans la région et de l'exploitation du champs.

# Bibliographie

- Albaret, J. (2003). *Caractérisation de l'état de référence des peuplements de poissons d'une aire protégée en zone de mangrove : le bolon de Bamboung (Sine Saloum, Sénégal)* <https://core.ac.uk/download/pdf/39844794.pdf>
- AMEMOU, Y. (2020). *MODELISATION BIOPHYSIQUE DE LA DISPERSION ET DE LA CROISSANCE DES LARVES DE SARDINELLES DANS LE GOLFE DE GUINEE* <https://rivieresdusud.uzh.ch/handle/123456789/1278>
- Annick, T. A. V. (2007). *Modélisation haute-résolution des courants dans le Golfe de Guinée : étude des oscillations bimensuelles.* <https://archimer.ifremer.fr/doc/2007/these-3647.pdf>
- AquaPortail, Q. (2023). gyre. AquaPortail. <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/14156/gyre>
- Mbaye, B.C (2015). *Etude de l'impact de l'environnement biophysique sur les premiers stades de vie de Sardinella aurita dans le système d'upwelling sénégal-mauritanien : modélisation saisonnière et interannuelle.* <https://theses.hal.science/tel-01583022>
- Badji, Y. (2019). *Variabilité spatio-temporelle de l'environnement marin de l'Aire Marine Protégée d'Abéné.* <https://rivieresdusud.uzh.ch/handle/123456789/947>
- Bouba, H. (2013). *Variabilité de la dynamique éolienne au sol (direction et vitesse du vent) et de ses conséquences (visibilité horizontale) au Sahel central et Sahara méridional entre 1950 et 2009 (Exemple de quelques stations synoptiques au Niger).* <https://hal.science/tel-01631374>
- Bourlès, B. (2010). *DESCRIPTION DE LA CIRCULATION OCEANIQUE ET DE SA VARIABILITE DANS L'OCEAN ATLANTIQUE TROPICAL.* <https://theses.hal.science/tel-01009613/>
- C. TEISSON.(.), *Le Phénomène d'Upwelling le long des cotes du Senegal caracteristiques physiques et modelisation.* (1983). Dans Centre de recherche oceanographique de Dakar-Thiaroye (Vol. 123). [https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers21-03/15418.pd](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers21-03/15418.pd)
- Capet, X., Estrade, P., Machu, É., Ndoye, S., Grelet, J., Lazar, A., Marié, L., Dausse, D., Brehmer, P. (2017). On the Dynamics of the Southern Senegal Upwelling Center : Observed Variability from Synoptic to Superinertial Scales. *Journal Of Physical Oceanography*, 47(1), 155-180. <https://doi.org/10.1175/jpo-d-15-0247.1>
- Chalghmi, H. (2015). *Etude de la pollution marine par les hydrocarbures et caractérisation de leurs effets biochimiques et moléculaires sur la palourde de Ruditapes sp.* <https://theses.hal.science/tel-01583022>
- Circulation oceanique. (2016). PLATEFORME OCÉAN & CLIMAT. Consulté le 1 décembre 2023, à l'adresse <https://ocean-climate.org/sensibilisation/la-circulation-oceanique/>

- 
- Communication présentée au Comité Permanent pour la Recherche et les Statistiques, ICCAT. (1998). *Changements hydroclimatiques observés dans l'Atlantique depuis les années 50 et impacts possibles sur quelques stocks de thons et leur exploitation*. Researchgate. Consulté le 12 juillet 2023, à l'adresse [https://www.researchgate.net/profile/Francis-Marsac/publication/228552349\\_Changements\\_hydroclimatiques\\_observes\\_dans\\_l'Atlantique\\_depuis\\_les\\_annees\\_50\\_et\\_impacts\\_possibles\\_sur\\_quelques\\_stocks\\_de\\_thons\\_et\\_leur\\_exploitation/links/09e4150e9402fe9bcd000000/Changements-hydroclimatiques-observees-dans-lAtlantique-depuis-les.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Francis-Marsac/publication/228552349_Changements_hydroclimatiques_observes_dans_l'Atlantique_depuis_les_annees_50_et_impacts_possibles_sur_quelques_stocks_de_thons_et_leur_exploitation/links/09e4150e9402fe9bcd000000/Changements-hydroclimatiques-observees-dans-lAtlantique-depuis-les.pdf)
- Conservation Nature. (s. d.). *La pollution des océans : définition, causes, et conséquences*. Conservation Nature. Consulté le 22 décembre 2023, à l'adresse <https://www.conservation-nature.fr/ecologie/la-pollution-des-occeans/>
- De L'Environnement et des Etablissements Classés Dakar, D. (2002). *Rapport national sur l'état de l'environnement marin et côtier*. <https://aquadocs.org/handle/1834/2884>
- Dème, E. H. B., Failler, P., Touron-Gardic, G. (2021). *La gouvernance des aires marines protégées au Sénégal : difficulté de la gestion participative et immobilisme des comités de gestion*. Vertigo, Volume 21 Numéro 1. <https://doi.org/10.4000/vertigo.30880>
- Dieye, D. E. B., Diaw, D. A. T., Sain, S. T., Ndour, N. N. (2013). *Dynamique de la mangrove de l'estuaire du Saloum (Sénégal) entre 1972 et 2010*. Open Edition. Consulté le 8 avril 2023, à l'adresse <https://journals.openedition.org/cybergeogeo/25671>
- Diop, L. K. (2019). *Le rôle de la dynamique océanique et atmosphérique en Atlantique Nord sur le fonctionnement de l'upwelling ouest-africain*. <https://theses.hal.science/tel-03363982>
- Diop, D. S., Barousseau, B. J. P., Giresse, G. P., Monteillet, M. J., Saos, S. J. L. (1986). Conséquences sédimentologiques de l'évolution climatique récente dans le delta du Saloum. *Researchgate*, 21, 89-98. [https://www.researchgate.net/publication/287488338\\_Consequences\\_sedimentologiques\\_de\\_l%27evolution\\_climatique\\_recente\\_dans\\_le\\_delta\\_du\\_Saloum](https://www.researchgate.net/publication/287488338_Consequences_sedimentologiques_de_l%27evolution_climatique_recente_dans_le_delta_du_Saloum)
- Diouf, D. S. (1993). Les courants et la circulation des eaux sur le plateau continental sénégalais [Mémoire, Centre de Formation des techniciens des pêches maritimes]. <https://aquadocs.org/bitstream/handle/1834/4073/courantsetcirculationeauxurplateaucontsngalais.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Domain, F., Chavance, P., Diallo, A. B. (1999). *La pêche côtière en Guinée : ressources et exploitation*. Institut de Recherche Pour le Développement. [https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers09-03/010025006.pdf](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers09-03/010025006.pdf)
- Etat du Senegal. (2016). DÉVELOPPEMENT DU CHAMP SNE PHASE 1 : Étude d'impact environnemental et social. Dans Woodside. Consulté le 24 mai 2023, à l'adresse <https://www.woodside.com/docs/default-source/current-consultation-activities/senegal-activities/developpement-du-champ-sne-phase-1---etude-d-impact-environnement.pdf>

- F.P Chavez et M.Messié(2009). *A comparison of Eastern Boundary Upwelling Ecosystems*<https://journals.openedition.org/cybergeogeo/25671>
- Galgani, F., Bruzaud, S., Duflos, G., Fabre, P., Gastaldi, E., Ghiglione, J., Grimaud, R., George, M., Huvet, A., Lagarde, F., Paul-Pont, I., Ter Halle, A. (2020). *Pollution des océans par les plastiques et les microplastiques*. HAL. <https://doi.org/10.51257/a-v1-bio9300>
- Goeury, D. (2014). *La pollution marine*. <https://hal.science/hal-01091818>
- Isabelle Niang, Diop. (1995). *Erosion côtière sur la petite côte du Sénégal à partir de l'exemple de Rufisque : passé, présent, futur*. [https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/pleins\\_textes\\_6/TDM/010008221.pdf](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/TDM/010008221.pdf)
- Jeyid, M. A. A. (2016). *Relations environnement et évolution spatio-temporelle des petits poissons pélagiques dans le système d'upwelling de la zone NW Africaine*. <https://theses.hal.science/tel-01551789>
- Kamara, S. (2013). *Développements hydrauliques et gestion d'un hydrosystème largement anthropisé : le delta du fleuve Sénégal*. <https://theses.hal.science/tel-00965106>
- Le Monde. (2022). *La pollution plastique a atteint « toutes les parties des océans » , alerte le WWF*. Le Monde. [https://www.lemonde.fr/planete/article/2022/02/08/la-pollution-plastique-a-atteint-toutes-les-parties-des-oceans-6112728\\_3244.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2022/02/08/la-pollution-plastique-a-atteint-toutes-les-parties-des-oceans-6112728_3244.html)
- Letcher, T. M., Vallerio, D. (2011). Waste [Chapiter 19] : A Handbook for Management. Academic Press. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780123814753100191>
- Lili la Mouette. (s. d.), Les courants océaniques . <https://www.lililamouette.com/la-mer/observer-la-mer/les-courants-oceaniques#2>
- Machu ,É., Capet , X., Estrade, P., Ndoye, S., Brajard, J., Baurand, F., Auger, P., Lazar ,A.,Brehmer, P. (2019). *First Evidence of Anoxia and Nitrogen Loss in the Southern Canary Upwelling System*. *Geophysical Research Letters*, 46(5), 2619-2627., <https://doi.org/10.1029/2018gl1079622>
- Manzelli, M., Fiorillo, E., Bacci, M., Tarchiani, V. (2015). *Lowland rice production in southern Senegal (Middle Casamance) : challenges and prospects for sustaining their restoration and development*. *Cahiers Agricultures*, 24(5), 301-312. <https://doi.org/10.1684/agr.2015.0772>
- Mbengue, B. A. (2016). *Évaluation de l'efficacité bioécologique des aires marines protégées (AMP) : le cas de l'AMP de Joal-Fadiouth*. <https://aquadocs.org/handle/1834/41981>
- Mingou, J. (2019). *L'aire marine protégée d'Abéné en Basse Casamance : gouvernance, exploitation des ressources, impacts environnementaux et socio-économiques*. <https://rivieresdusud.uasz.sn/xmlui/handle/123456789/1278>
- Ministre de l'environnement et du développement durable (Sénégal)). (2018). 3 e Edition de la Conférence nationale sur le Développement durable : *Thème : « Pour une exploitation durable et saine des ressources gazières et pétrolières »*. Consulté le 16 janvier 2024, à l'adresse [https://itie.sn/wp-content/uploads/2021/06/Rapport\\_final\\_Comite-Scientifique\\_PAD\\_2018.pdf](https://itie.sn/wp-content/uploads/2021/06/Rapport_final_Comite-Scientifique_PAD_2018.pdf)
- Ndom, B. (2019). *Description de la circulation océanique côtière et de sa variabilité sur la côte Sud du Sénégal* <https://rivieresdusud.uasz.sn/handle/123456789/902>

- Ndoye, S., Capet, X., G. A. (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.*, <https://www.theses.fr/2016PA066372>.
- Ndoye, S., Capet, X., Estrade, P., Sow, B. A., Dagorne, D., Lazar, A., Gaye, A. T., Brehmer, P. (2014). SST, patterns and dynamics of the southern Senegal-Gambia upwelling center. *Journal Of Geophysical Research : Oceans*, 119(12), 8315-8335. <https://doi.org/10.1002/2014jc010242>
- Ndoye, S., Capet, X., Estrade, P., Sow, B. A., Machu, É., Brochier, T., Döring, J., Brehmer, P. (2017). Dynamics of a “low-enrichment high-retention” upwelling center over the southern Senegal shelf. *Geophysical Research Letters*, 44(10), 5034-5043. <https://doi.org/10.1002/2017gl072789>
- Ndoye, S., Capet, X., Estrade, P., Machu É., Kounta L , Sow B A., Diakhaté M., Gaye A.T. (2018). A numerical modeling study of the Southern Senegal upwelling shelf : Circulation and upwelling source waters. *African Journal Of Environmental Science And Technology*, 12(12), 487-500. <https://doi.org/10.5897/ajest2018.2572>
- Ngom, N. F. (2005). *LES FONCTIONS DE LA MANGROVE DANS LA STRUCTURATION ET LA BIOLOGIE DES PEUPELEMENTS DE POISSONS DE L'ESTUAIRE DU SINE-SALOUM (SENEGAL - AFRIQUE DE L'OUEST)* [Thèse doctorale, Université Cheikh Anta Diop de Dakar]. [http://intranet.isra.sn/aurifere/opac\\_css/docnum/OC1702415.pdf](http://intranet.isra.sn/aurifere/opac_css/docnum/OC1702415.pdf)
- Pantelodimou, E. (2013). *LA LUTTE CONTRE LA POLLUTION MARINE EN FRANCE.* <https://theses.hal.science/tel-0207480>
- P.Puerta, C.Jonshon, M.Carreiro-Silva (2020). *Influence of Water Masses on the Biodiversity and Biogeography of Deep-Sea Benthic Ecosystems in the North Atlantic.* <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2020.00239/full>
- Rebert, J. . P. R. (1982). *HYDROLOGIE ET DYNAMIQUE DES EAUX DU PLATEAU CONTINENTAL SENEGALAIS.* Dans *Centre de recherche océanographique de Dakar (No 17490; Vol. 89)*. [https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers11-12/17490.pdf](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers11-12/17490.pdf)
- S.Faye (2015). *A model study of the seasonality of sea surface temperature and circulation in the Atlantic North-eastern Tropical Upwelling System.* <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphy.2015.00076/full>
- Sakho, I. (2011). *Évolution et fonctionnement hydro-sédimentaire de la lagune de la Somone, Petite Côte, Sénégal.* <https://theses.hal.science/tel-00680519>
- Sandra Kloff, Clive Wicks,(2005) *Gestion environnementale de l'exploitation de pétrole offshore et du transport maritime pétrolier* <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2005-015-Fr.pdf>
- SANGOMAR FIELD DEVELOPMENT PHASE 1. (2021). Dans Woodside. Consulté le 5 mai 2023, à l'adresse [https://www.woodside.com/docs/default-source/our-business---documents-and-files/senegal---documents-and-files/sangomar-factsheet-\(english\).pdf](https://www.woodside.com/docs/default-source/our-business---documents-and-files/senegal---documents-and-files/sangomar-factsheet-(english).pdf)
- SPA-ITIE. (s. d.). PROJET SANGOMAR. Itie.sn. Consulté le 5 mai 2023, à l'adresse <https://itie.sn/aperçu-du-secteur-2/projet-sangomar/>
- Senepplus. (2018). *EXPLOITATION DU CHAMP PÉTROLIER SNE [Communiqué de presse]*. Consulté le 25 mai 2023, à l'adresse <https://www.senepplus.com/economie/exploitation-du-champ-petrolier-sne>

- Sow, B. A. (2014). *ETAT MOYEN ET VARIABILITE SAISONNIERE DE L'UPWELLING SENEGALO-MAURITANIEN : APPROCHE MODELISATION* [Thèse de doctorat]. Université Cheikh Anta Diop de Dakar.
- VOITURIEZ, V. B. (2012). *La circulation générale océanique*. Dans *Oceano.org*. [https://www.oceano.org/wp-content/uploads/2020/02/21.Circulation-ge%CC%81ne%CC%81rale\\_Voituriez.pdf](https://www.oceano.org/wp-content/uploads/2020/02/21.Circulation-ge%CC%81ne%CC%81rale_Voituriez.pdf)
- Capet, X. (2019). *Le rôle de la dynamique océanique et atmosphérique en Atlantique Nord sur le fonctionnement de l'upwelling ouest-africain*. <http://www.theses.fr/>  
[.https://www.theses.fr/2019SORUS649](https://www.theses.fr/2019SORUS649)

# Annexe

## *L'Aire Marine Protégée de Sangomar*

L'Aire Marine Protégée de Sangomar est située sur l'océan Atlantique, au débouché du Delta du Saloum et s'étend vers le Sud sur une vingtaine de kilomètres à partir de Palmarin marquant ainsi la fin de la petite côte à l'ouest du Sénégal. Le champs Sangomar se trouve approximativement à 50km à l'ouest de l'AMP de Sangomar d'où la vulnérabilité de celle-ci liée à sa proximité avec l'exploitation de ce champs. L'Aire Marine Protégée (AMP) de "Sangomar" couvre une étendue de 87 437 hectares, dont une grande partie se trouve à l'intérieur de la Réserve de Biosphère du Delta du Saloum(Phase\_1 du Développement du champ pétrolier). L'AMP est située entre les Communautés rurales de Palmarin et de Dionewar. Ses limites géographiques sont définies par la Communauté rurale de Fimela au Nord, l'océan Atlantique à l'Ouest qui s'étend sur toute la partie occidentale, le bras de mer du Saloum au Sud et à l'Est, séparant Sangomar de l'arrondissement de Niodior (figure 3.19). Au Nord, elle est limitée par l'AMP de Joal Fadiouth, au Sud par le Parc National du Delta du Saloum, à l'est par la Réserve Naturelle Communautaire (RNC) de Palmarin et les Communautés rurales de Bassoul et de Djirnda. À l'ouest, son périmètre s'étend jusqu'à l'océan Atlantique. En effet, l'AMP de Sangomar est constituée de mangroves et d'organismes, notamment les poissons, les crustacés, les mollusques et les tortues marines. En réalité, l'estuaire du Saloum est caractérisé par la présence de mangroves le long de ses rives et dans ses zones intertidales. Les mangroves de l'estuaire du Saloum jouent un rôle essentiel dans la préservation de la biodiversité locale, offrant des habitats de reproduction pour les poissons et les crustacés, abritant des oiseaux migrateurs, et agissant comme barrière naturelle contre l'érosion côtière (Ngom,2005). De plus, elles permettent la riziculture, la pêche et aussi elle sert de lieux de ponte pour certains espèces. L'impact de la pollution dans l'AMP de Sangomar, en lien avec l'exploitation du champ pétrogazier, est une préoccupation majeure en raison des risques potentiels que cela peut poser pour l'écosystème marin et les communautés locales. En effet, l'exploitation pétrogazière peut entraîner l'introduction de substances chimiques nocives dans l'environnement marin due aux déversements accidentels, les rejets d'eaux usées et les effluents de production pouvant contenir des hydrocarbures, des métaux lourds et d'autres composés toxiques. Ces rejets de substances chimiques peuvent altérer la qualité de l'eau dans l'AMP de Sangomar et ainsi avoir des conséquences sur la vie marine, en affectant la santé des organismes aquatiques et en perturbant les processus écologiques naturels. Ainsi, en cas d'accidents de déversement du pétrole entraînant la contamination direct des mangroves, le pétrole peut recouvrir les racines et le sol, entraînant la mort des plantes et affectant la faune associée car les mangroves abritent une variété d'espèces marines et terrestres, sans oublier qu'elles luttent contre l'érosion côtière. Les polluants provenant de l'exploitation pétrogazière peuvent affecter la faune et la flore locales, entraînant une diminution des populations d'organismes et une perturbation des équilibres écologiques. Il est important de souligner que la mise en œuvre de mesures de

prévention, de surveillance et de réhabilitation est cruciale pour atténuer les effets de la pollution résultant de l'exploitation pétrogazière

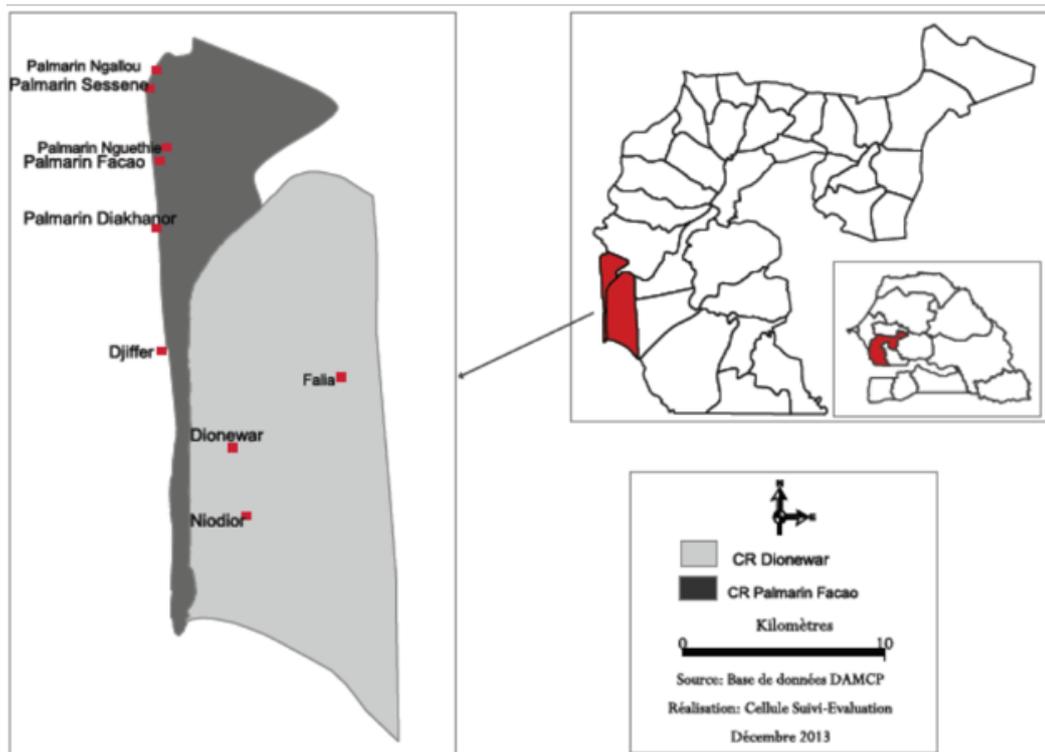


FIGURE 3.20 – Carte de localisation de l'AMP de Sangomar

Extrait de

[<https://www.damcp.gouv.sn/content/aire-marine-protégée-de-sangomar>]