

**Full Length Research Paper**

Stratégie de modélisation de l'estuaire de la Casamance et identification des zones exposées en cas de déversement d'hydrocarbures

Bamol Ali Sow^{1*}, Siny Ndoye², Ramatoulaye Diagne¹, Birane Ndom¹, Youssouph Badji¹, Amadou Diouf¹, Issa Ba¹, Arame Dièye¹, Moustapha Sow¹, Habib Boubacar Dieng¹, Eliane Diatta¹, Penda Touré, Ousmane Diankha³, Issa Sakho²

¹LOSEC - Université Assane Seck de Ziguinchor, Ziguinchor, Sénégal

²Université Amadou Mahtar Mbow (UAM) de Diamnadio, Dakar, Sénégal

³Université Iba Der Thiam (UIDT), Thiès, Sénégal

Received June 2025 – Accepted October 2025



*Corresponding author. bsow@univ-zig.sn

Author(s) agree that this article remain permanently open access under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 International License.

Résumé:

L'exploitation du pétrole offshore au Sénégal, bien que représentant une opportunité sur le plan économique s'accompagne d'un certain nombre d'incertitudes sur l'impact que cette activité pourrait avoir sur l'environnement marin au large des côtes sénégalaises. Face à ces incertitudes, le Laboratoire d'Océanographie, des Sciences de l'Environnement et du Climat (LOSEC) de l'Université Assane Seck de Ziguinchor (UASZ) s'est donné comme objectif de se focaliser sur l'estuaire de la Casamance qui représente un enjeu économique et environnemental pour les populations riveraines.

Ce travail présente les stratégies développées pour mettre en place et pérenniser une plateforme d'observation et de modélisation pour un suivi environnemental. Il a pour objectif (1) d'étudier les processus physiques qui gouvernent la salinisation et la dynamique sédimentaire de l'estuaire de la Casamance et (2) d'identifier les zones potentiellement exposées à la pollution pouvant provenir de l'exploitation des hydrocarbures sur la plateforme Sangomar Offshore.

Pour atteindre cet objectif, le modèle de circulation océanique régional CROCO et le module lagrangien ROMS Offline (ROFF) sont utilisés pour étudier (1) la dynamique océanique et (2) la dispersion et la trajectoire des différentes particules lâchées dans la zone d'exploitation.

Les résultats des expériences numériques ont permis d'analyser les impacts potentiels sur l'exposition de certaines zones. Plus précisément, les résultats montrent que la dispersion des particules est fortement soumise à la variabilité saisonnière de la dynamique océanique locale caractérisée par des courants Onshore (vers la côte) et Offshore (vers le large) pendant les périodes chaudes et froides respectivement.

Mots clés: Modélisation, dispersion, pollution, exposition, Estuaire de la Casamance.

Cite this article:

Bamol Ali Sow, Siny Ndoye, Ramatoulaye Diagne, Birane Ndom, Youssouph Badji, Amadou Diouf, Issa Ba, Arame Dièye, Moustapha Sow, Habib Boubacar Dieng, Eliane Diatta, Penda Touré, Ousmane Diankha, Issa Sakho. (2025). Stratégie de modélisation de l'estuaire de la Casamance et identification des zones exposées en cas de déversement d'hydrocarbures. Revue RAMReS – Sci. Appl. & de l'Ing., Vol. 7(1), pp. 8-14. ISSN 2630-1164.

1. Introduction

La stratégie nationale pour la préservation de la biodiversité marine et côtière est basée, entre autres, sur la création des Aires Marines Protégées (AMP) en étroite collaboration avec les communautés locales (Figure 1).

Du point de vue du développement économique, la stratégie nationale accorde une importance particulière à l'exploitation des ressources minières du pays (Figure 2).

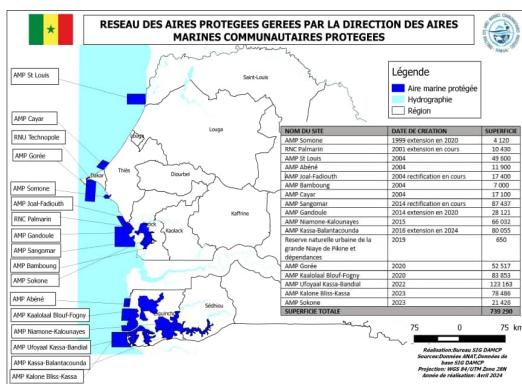


Figure 1 Methodology for GIS-BIM Integration

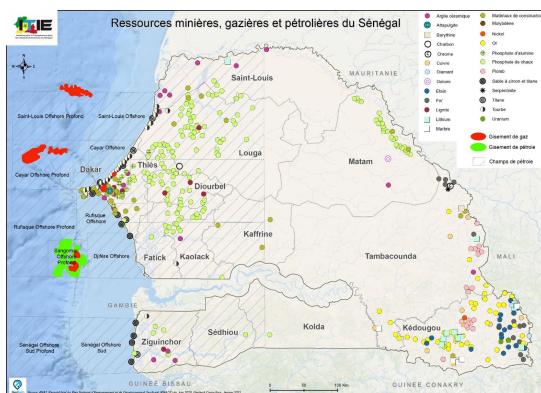


Figure 2 : Ressources minières, gazières et pétrolières du Sénégal (PNADT, 2020).

Cette exploitation du pétrole offshore pose avec acuité la problématique de l'exposition de l'environnement marin et côtier à de potentiels déversements accidentels. Plus précisément quel pourrait être l'impact d'une pollution par les hydrocarbures sur les AMP qui sont des aires de conservation de la biodiversité ?

Pour répondre à cette question le Laboratoire d'Océanographie, des Sciences de l'Environnement et du Climat (LOSEC) de l'Université Assane Seck de Ziguinchor (UASZ), en collaboration avec des partenaires nationaux et internationaux, a développé une stratégie sur la recherche pour la connaissance et la compréhension des phénomènes physiques pouvant expliquer les évolutions spatio-temporelles de polluants dans la zone. Les activités du LOSEC contribuent significativement à la compréhension de la dynamique océanique locale et fournissent des informations cruciales pour la préservation des écosystèmes marins.

2. Matériaux et méthodes

Pour traiter la question de la pollution marine et côtière, le LOSEC de l'UASZ a développé deux stratégies complémentaires.

2.1. Stratégie d'Observation de l'estuaire de la Casamance

Avec l'appui financier du Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation (projet FIRST), le centre d'excellence AGIR et le projet SOLAB (SCOPES) des sorties sont organisées dans

l'estuaire de la Casamance pour mesurer directement des paramètres physico-chimiques tels que la salinité, l'oxygène dissous, la température de l'eau et le pH à l'aide de sondes RBR et HANNA et de CTD WISSENS mais aussi pour prélever des échantillons d'eau, de sédiments et de ressources halieutiques, destinés aux analyses en laboratoire (Figure 3)

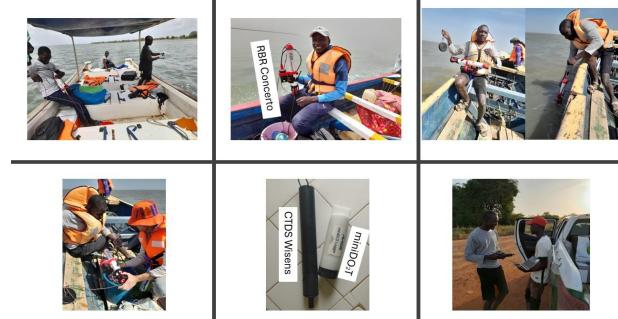


Figure 3 : campagnes de mesures réalisées sur le transect Carabane – Pointe Saint Georges.

Les sorties dans l'estuaire de la Casamance peuvent être regroupées en deux catégories :

- Les sorties mensuelles sur le transect Carabane – Pointe Saint Georges (Figure 4) qui permettent entre autres, de suivre l'évolution du gradient longitudinal de salinité ;

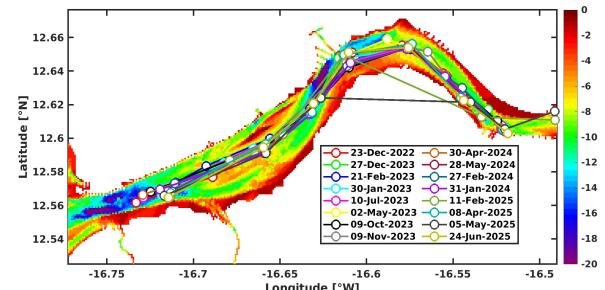


Figure 4 : transect longitudinal Carabane – Pointe Saint Georges aux différentes dates de sortie. La couleur représente la bathymétrie.

- Les sorties saisonnières (saisons marines) dans les AMP pour suivre l'évolution de la concentration de différents polluants dans l'eau, les sédiments et la ressource halieutique (Figure 5).



Figure 5 : Activités de prélèvement des échantillons biologiques (poissons et huîtres) et des sédiments dans les AMP de l'estuaire de la Casamance (Badji et al., 2025).

Aussi, dans le cadre d'un partenariat avec le Ministère de l'Environnement et de la Transition Écologique (METE) des stations fixes sont implantées à Carabane et Ziguinchor pour mesurer les courants, les niveaux d'eau et la température à l'aide de deux Aquadop (Figure 6).



Figure 6 : Dispositif de mesure in situ : installation, déploiement et récupération des capteurs d'Aquadopp dans l'estuaire de la Casamance. Le capteur 1 sur ST1 (aval de l'estuaire) et le capteur 2 sur ST3 (amont de l'estuaire) sont déployés en 2023, configurés avec une fréquence d'acquisition de 30 secondes et une moyenne temporelle toutes les 10 minutes (Diouf et al., 2025a).

Cette collecte des données sur les paramètres physico-chimiques (salinité, température, oxygène dissous, pH, courants, niveaux d'eau, concentrations de certains polluants comme les métaux lourds et les HAP, nitrates, phosphore, etc.) ont permis d'avoir une connaissance actualisée du milieu physique et de valider les simulations utilisées dans la stratégie de modélisation.

2.2. Stratégie de Modélisation dans l'estuaire de la Casamance

La stratégie de modélisation des processus physiques dans l'estuaire de la Casamance repose sur l'utilisation de modèles hydrodynamiques et sédimentaires pour obtenir les conditions océaniques (température, salinité, marées, courants, vagues, sédiments) mais aussi sur des modèles lagrangiens pour faire le suivi de particules dans le milieu en lien avec le transport de polluants.

Les configurations du modèle hydrodynamique CROCO (figures 7 et 8) sont la grille SEN2 à 2 km de résolution qui couvre les côtes sénégalaises entre Dakar et Cap Skirring et la grille CASAM200 à 200 m de résolution spatiale autour de l'estuaire de la Casamance, étendu au domaine maritime et toute la partie ouest de l'estuaire du fleuve Casamance (jusqu'à Ziguinchor où l'estuaire devient plus étroit) (Ndom et al., 2025).

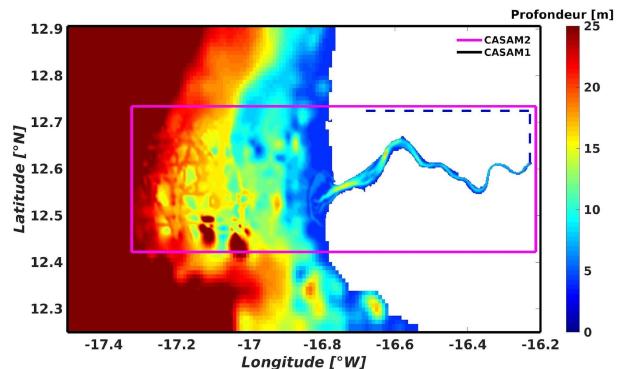


Figure 7 : bathymétrie du domaine d'étude des deux grilles de la configuration. Le domaine haute résolution (CASAM200) est représenté par la zone dans le rectangle magenta et CASAM1 représenté en rectangle noir (Ndom et al., 2025).

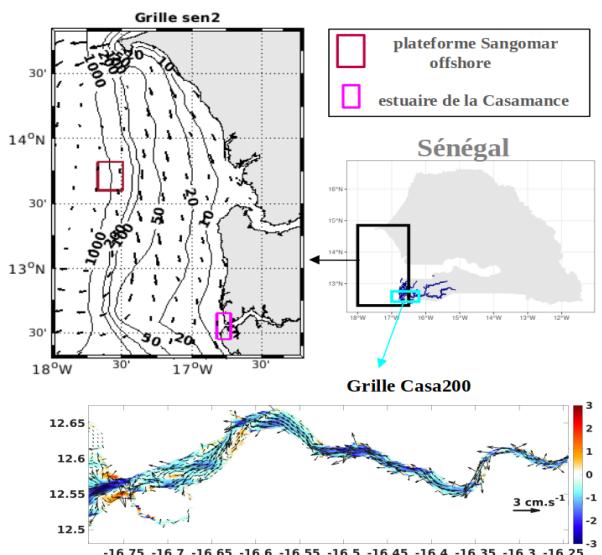


Figure 8 : grille de la configuration sen2 avec 2 km de résolution horizontale (Ndoye et al. 2017). Les positions de la plateforme Sangomar et de l'estuaire de la Casamance sont indiquées par des cadres rouge et magenta, respectivement. La bathymétrie du plateau continental et la climatologie annuelle du courant de surface sur la période 2010-2019 sont indiqués par des isolignes et des flèches, respectivement. Les courants moyens pendant la saison sèche (Janvier-Juin) sont indiqués par des flèches et les valeurs positives (respectivement négatives) représentent l'amplitude du courant zonal entrant dans l'estuaire vers l'est (respectivement sortant vers l'ouest).

La configuration CasaFlow du modèle Delf3D à 124 m de résolution horizontale (Figure 9) a permis d'étudier la dynamique morpho-sédimentaire dans l'estuaire de la Casamance

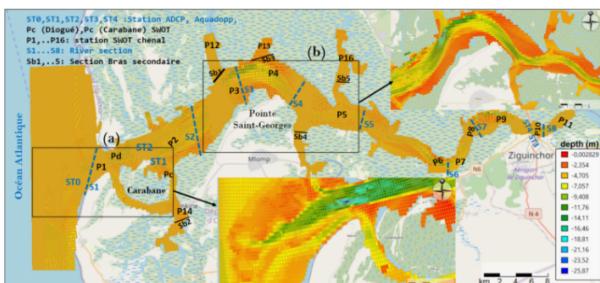


Figure 9 Grille de la configuration CasaFlow appliquée à l'estuaire de la Casamance, basée sur une grille curviligne structurée (résolution horizontale ~124 m, 15 couches verticales). La carte illustre la bathymétrie, les stations marégraphiques (ST0-ST4), les stations SWOT (P1-P11) et les transects principaux (S1-S8) et secondaires (Sb). La palette de couleurs, du bleu au rouge, indique la variation bathymétrique (Diouf et al. 2025b).

Pour le suivi lagrangien, il y a différentes manières d'aborder le problème en utilisant les modules lagrangiens ROFF et ICHTHYOP :

- Lâcher les particules au niveau des plateformes d'exploitation et suivre leur évolution vers les zones sensibles (forward) ;
- Lâcher les particules au niveau des zones sensibles et chercher à trouver leur provenance (backward) (Figure 10).

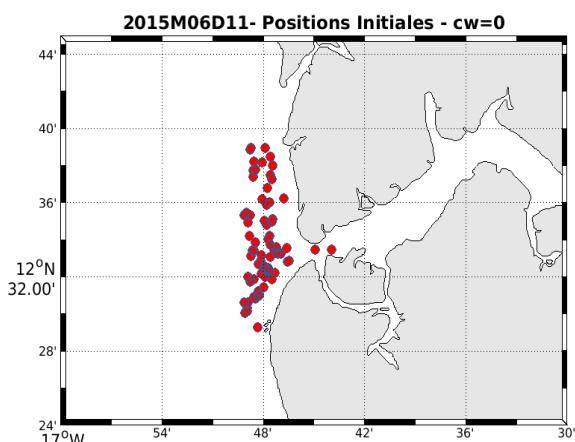


Figure 10 : Positions initiales des particules lâchées à l'entrée de l'estuaire de la Casamance (Badji et al., 2025).

Cette stratégie d'observation et de modélisation dans l'estuaire de la Casamance a permis d'aboutir à des résultats encourageants à travers des mémoires de master 2, des thèses de doctorat et des publications dans des revues spécialisées.

Pour illustrer cet effort du LOSEC de l'UASZ et ses partenaires nationaux et internationaux sur l'estuaire de la Casamance, nous présentons dans la partie qui suit les résultats obtenus dans le cadre d'une étude visant à identifier les zones d'exposition à la pollution marine et côtière.

3. Résultats

3.1. Description de l'expérience lagrangienne

Les expériences lagrangiennes de dispersion de polluants sont indispensables pour étudier l'éventualité de catastrophes maritimes impliquant les industries d'exploitation de ressources *Offshore*.

Cette étude a utilisé le module ROFF (*Roms Offline*) qui permet de simuler les trajectoires des particules d'eau à partir des champs de vitesse simulés par le modèle CROCO (grille Sen2).

L'expérience consiste à :

- Effectuer un lâcher de 1000 particules le 1^{er} de chaque mois, de Janvier à Décembre à la station Sangomar ;
- Répéter l'expérience tous les 5 jours, soit 6 lâchers par mois correspondant à 6000 particules par mois ;
- Suivre les particules pendant quatre (04) mois (120 jours) à partir du 1^{er} lâcher de chaque mois.

3.2. Variabilité des courants de surface

La variabilité mensuelle des courants de surface a permis de distinguer deux grandes périodes temporelles (Figure 11) :

- La période de Janvier à Mai (JFMAM) est dominée par les alizés de nord-est, vents secs qui soufflent depuis le continent vers l'océan. Sous l'effet de ces alizés, la circulation de surface présente une composante zonale vers le large (ouest), au-delà de l'isobathe 500 m (limite du plateau continental), correspondant à une circulation *Offshore*. Sur le plateau continental, situé à l'est de l'isobathe 500 m, les courants s'orientent vers le sud à sud-est, en lien avec le transport induit par la friction du vent et les mécanismes d'*upwelling* côtier associés ; La période de Juin à Septembre (JJAS) est marquée par l'installation de la mousson de sud-ouest, vent humide issu de l'Atlantique tropical. Cette configuration modifie profondément la circulation de surface, avec l'apparition de courants côtiers *Onshore* dirigés vers la côte. On observe ainsi des courants de surface vers l'ouest au nord de Dakar, tandis que la zone de Sangomar est soumise à des courants de surface orientés vers l'est, traduisant une circulation plus complexe et localisée.

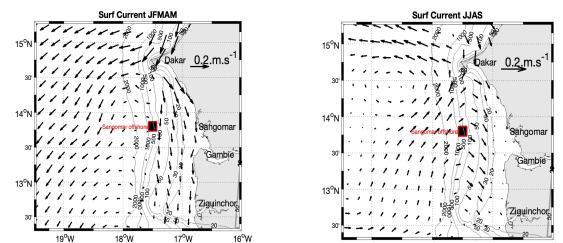


Figure 11 : Courants de surface moyennés sur les périodes JFMAM (gauche) et JJAS (droite). Le carré noir entouré de rouge représente le champ pétrolier de Sangomar (Diagne et al., 2024).

3.3. Variabilité des trajectoires des particules lâchées à Sangomar durant l'année 2017

Les résultats de l'expérience lagrangienne montrent que les particules sont essentiellement advectées vers l'ouest en dehors du plateau continental, principale zone d'activités humaines entre Janvier et Avril et entre Octobre et Décembre alors qu'entre Mai et Septembre elles sont présentes sur le plateau continental et vers la côte pouvant ainsi impacter négativement sur les activités humaines et les zones protégées (Figure 12).

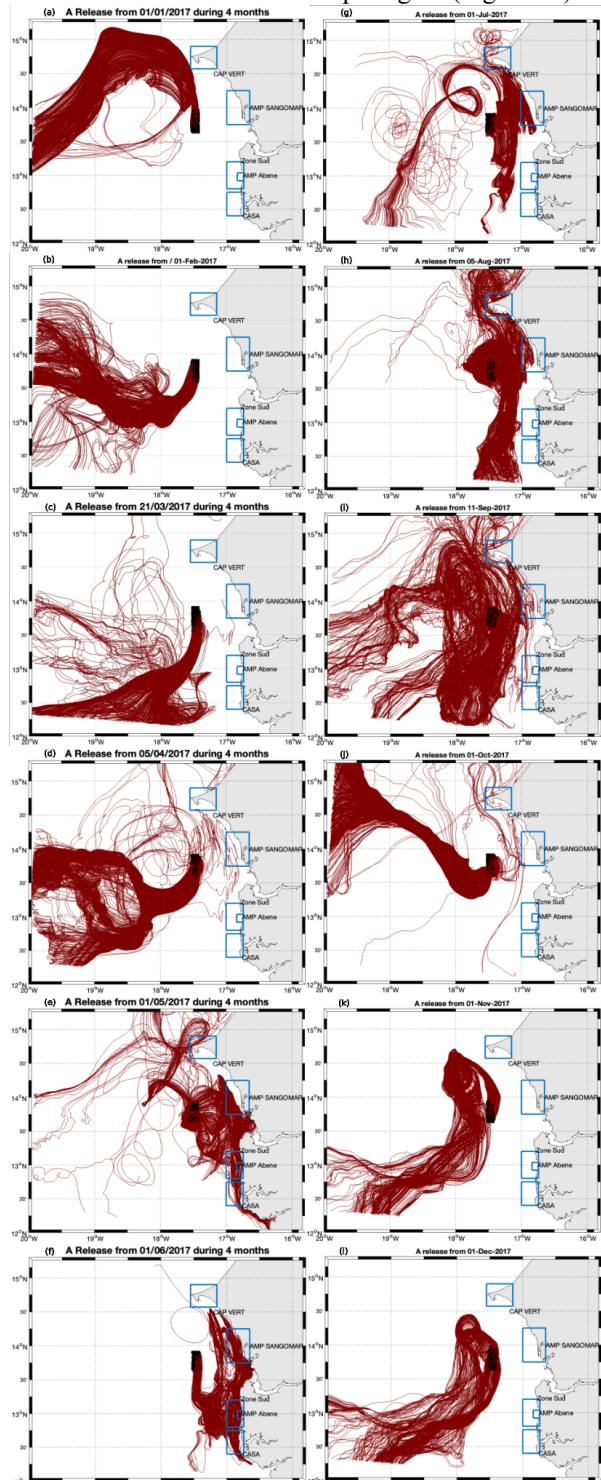


Figure 12 : Trajectoires (en rouge) de 1000 particules lâchées (en mode Forward) au niveau de champ pétrolier de Sangomar (tâche noire) durant les 12 mois de l'année 2017 sans forçage éolien (Diagne, 2024).

De Janvier à Avril, les particules se dirigent essentiellement vers le large traduisant un risque faible de pollution, même si on observe quelques particules qui se dirigent vers la côte en Avril, correspondant probablement à la période de relaxation des alizés. Le mois de Mai représente une transition entre les deux saisons et se matérialise par un transport important de particules sur la côte Sud (AMP de Sangomar, Zone Sud, AMP d'Abene) et aussi un peu au nord vers Dakar. Certaines particules se dirigent vers le large à cause de la présence des alizés du nord à cette période.

La période chaude, de Juin à Septembre est caractérisée par un risque élevé de pollution observé le long de la côte en raison de l'établissement de la mousson, un vent soufflant du sud-ouest vers le nord-est, 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, on retrouve la situation de Janvier à Avril où les particules se dirigent vers le large correspondant à un faible risque de pollution des zones d'intérêt.

3.4. Critère pour l'ordre d'intervention dans les zones d'intérêt en cas de déversement accidentel ?

Outre les enjeux socio-économique, environnemental, politique, ..., l'ordre d'intervention dans les zones d'intérêt peut dépendre du temps de parcours pour atteindre ces zones et de la quantité des particules transportées dans ces zones. La figure 13 montre différentes situations sur 4 zones d'exposition.

En termes de quantité de particules atteignant les quatre zones d'intérêt dans un intervalle de temps donné, le Tableau 1 montre que le mois de Mai représente un pic pour la zone Sud autour de Abéné et pour la Casamance alors que pour l'AMP de Sangomar et le Cap Vert (Dakar) le pic est représenté par le mois de Juin. Cela signifie que sur les 6000 particules lâchées en Juin il y a plus de particules atteignent l'AMP de Sangomar (4325 particules) en peu de temps (36 jours), comparé au Cap Vert pour le même mois de lâcher (1547 particules en 42 jours). De la même manière, sur les 6000 particules lâchées au mois de Mai, il y a plus de particules qui atteignent la Zone Sud entourant Abéné (4176 particules en 31 jours) comparé à la zone Casamance (2719 particules) mais dans un intervalle plus court (28 jours).

Tableau 1 : Quantité de particules lâchées en Mai et Juin atteignant les zones d'intérêt dans un intervalle de temps.

Zone d'intérêt	Pic (mois)	Quantité de Particules	Pourcentage	Nombre de jours
Sangomar	Juin	4325	86,5	36
Cap Vert	Juin	1547	27,8	42
Zone Sud	Mai	4176	69,6	31
Casamance	Mai	2719	45,3	28

Ces critères (quantité de particules et temps de parcours), combinés aux enjeux socio-économiques des zones d'intérêt peuvent être utilisés pour orienter les

priorités en termes d'intervention en cas de pollution accidentelle.

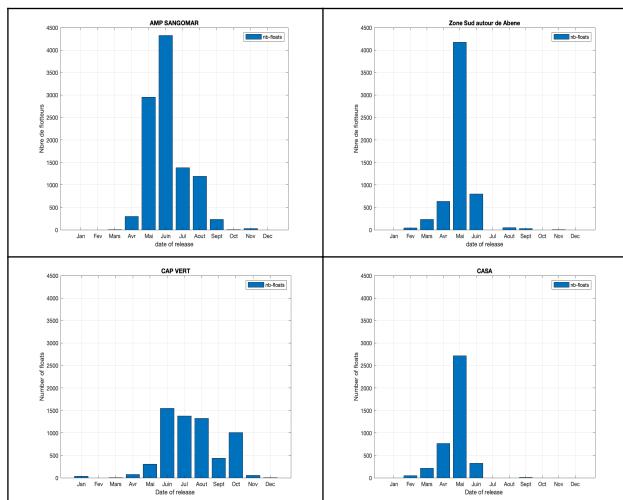


Figure 13 : Nombre de particules arrivant dans chaque zone d'intérêt durant toute l'année 2017.

3.5. Exposition des zones côtières à la pollution en lien avec la circulation océanique.

En lien avec la circulation océanique de surface, le plateau continental limité par l'isobathe 500 m (bleue) est plus exposé à la pollution marine en cas d'accident, à cause des courants de surface (figure 14).

Les zones côtières constituant le plateau continental où les activités marines sont beaucoup plus présentes, sont principalement exposées à la pollution en cas de déversement accidentel. Cependant, la cartographie des zones exposées à la pollution nécessite la prise en compte de divers paramètres environnementaux et écologiques spécifiques.

L'importance de chaque zone d'intérêt dans la cartographie des zones vulnérables réside dans leurs caractéristiques uniques et leur rôle crucial dans l'équilibre écologique de la région.

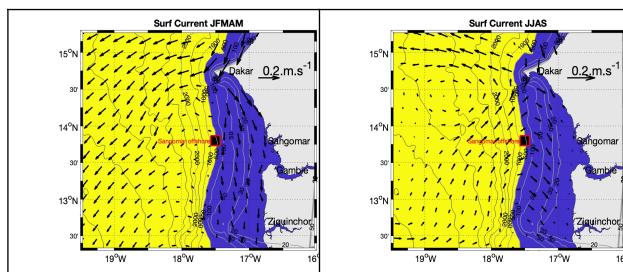


Figure 14 : Zones exposées à la pollution (en bleu) en lien avec la direction et le sens des courants de surface représentés par des flèches noires. Le carré noir représente le champ pétrolier de Sangomar.

4. Conclusion

La stratégie d'observation et de modélisation mise en place dans le cadre de l'étude de la dynamique environnementale de l'estuaire de la Casamance a permis de former les étudiants à l'instrumentation et aux outils de modélisation, de produire des connaissances sur les variations du milieu physique et

ses impacts et de disposer d'une situation de référence à partir de laquelle nous comptons faire un suivi sur le long terme, en perspectives.

Les résultats préliminaires obtenus sur la trajectoire des particules lâchées à la station d'exploitation pétrolière de Sangomar ont permis de montrer une forte exposition des zones côtières aux risques de pollution surtout en période d'hivernage (JJAS).

Dans la suite des efforts actuels le LOSEC envisage de :

- Faire de l'estuaire de la Casamance « *un laboratoire in-situ pluridisciplinaire* » en collaboration avec différents acteurs intervenant dans le domaine environnemental (services ministériels, universités, etc) ;
- Augmenter la fréquence des campagnes de mesures *sur plusieurs* années pour avoir des tendances significatives en termes de variabilité intra-saisonnière, saisonnière et interannuelle de tous ces paramètres ;
- Revisiter et affiner les méthodes de mesures et d'analyses des échantillons prélevés ;
- Développer d'avantage la modélisation numérique qui permet d'accéder à la prédition afin d'avoir un outil d'aide à la décision ;
- S'investir dans la conception des capteurs « *low cost* » qui constituent une alternative aux équipements lourds quelques fois inaccessibles.

Remerciements

Nous remercions le Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, le centre d'excellence AGIR, le projet SOLAB et le projet AMP Mangrove pour le soutien financier qui a permis d'acquérir les données *in situ* dans l'estuaire de la Casamance.

REFERENCES

- [1] Badji, Y., Diankha, O. and Sow, B. A. (2025). Study of heavy metal contamination of *Sarotherodon melanotheron* and *Crassostrea gasar* In Casamance river (Senegal). International Journal of Biological and Chemical Sciences, 19(1), 48–57.
- [2] Diagne, Ramatoulaye (2024). Mémoire de Master 2 Physique et Applications, spécialité Sciences de l'Atmosphère et de l'Océan. Université Assane Seck de Ziguinchor, 67 p.
- [3] Diouf, A., I. Sakho, B. A. Sow, J. Deloffre, M. S. Seujip, M. B. Diouf and R. Lafite (2025a). The Influence of Tidal Distortion on Extreme Water Levels in Casamance Estuary, Senegal. Estuaries and Coasts 48:42. 22 p.
- [4] Diouf, A., E. Salameh, I. Sakho, B. A. Sow, J. Deloffre, C. L. Solano, E. I. Turki and R. Lafite (2025b). Use of SWOT Data for Hydrodynamic Modelling in a Tropical Microtidal Estuarine System : the Case of Casamance (Senegal). Remote Sens., 17, 3252. 36 p.

- [5] Ndom, B., S. Ndoye, B. A. Sow and V. Echevin (2025) : Tides in the casamance estuary: A modeling study. *Continental Shelf Research*, 285, 105389.
- [6] Ndom, Birane (2025) : Salinisation de l'estuaire de la Casamance : modélisation des processus physiques. Thèse de doctorat en cotutelle entre Université Assane Seck de Ziguinchor et Sorbonne Université, 177 p.
- [7] Ndoye, S., X. Capet, P. Estrade, B. Sow, E. Machu, T. Brochier, J. Döring, and P. Brehmer (2017). Dynamics of a “low-enrichment high-retention” upwelling center over the southern Senegal shelf. *Geophys. Res. Lett.*, 44, doi:10.1002/2017GL072789.