

Dynamique Spatio-Temporelle des Paramètres Hydrologiques et Influence sur la Salinité de l'estuaire côtier de la Bouche du Roy

Romaine Assogba-Ballè

Laboratoire d'Hydraulique et de Maîtrise de l'Eau (LHME),
Institut National de l'Eau, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Benin

D.M. Maurice Ahouansou

Laboratoire d'Hydraulique et de Maîtrise de l'Eau (LHME),
Institut National de l'Eau, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Benin
Laboratoire du Génie Rural et de Mécanisation Agricole (LGRMA), Faculté
des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Benin
Département d'Aménagement et Gestion de l'Environnement (DAGE),
Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi, Benin

Luc O. Sintondji

Laboratoire d'Hydraulique et de Maîtrise de l'Eau (LHME),
Institut National de l'Eau, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Benin

[Doi:10.19044/esj.2025.v21n35p169](https://doi.org/10.19044/esj.2025.v21n35p169)

Submitted: 09 October 2025
Accepted: 25 November 2025
Published: 31 December 2025

Copyright 2025 Author(s)
Under Creative Commons CC-BY 4.0
OPEN ACCESS

Cite As:

Assogba-Ballè, R., Ahouansou, D.M.M. & Sintondji, L.O. (2025). *Dynamique Spatio-Temporelle des Paramètres Hydrologiques et Influence sur la Salinité de l'estuaire côtier de la Bouche du Roy*. European Scientific Journal, ESJ, 21 (35), 169.

<https://doi.org/10.19044/esj.2025.v21n35p169>

Résumé

L'estuaire côtier de la Bouche du Roy constitue une interface dynamique entre les eaux continentales et marines, jouant un rôle essentiel dans les échanges hydrologiques, biologiques et écologiques. Du fait de sa salinité particulière, il abrite des fonctions écosystémiques stratégiques. Afin de caractériser la dynamique spatio-temporelle de ses paramètres hydrologiques et leur influence sur la salinité, un échantillonnage systématique a été réalisé sur trente et une (31) stations, dont six localisées aux embouchures et vingt-cinq réparties de manière équidistante dans l'estuaire. Les paramètres hydrologiques (vitesse et direction des courants, hauteur d'eau) et physico-chimiques (température, salinité, turbidité, oxygène

dissous et conductivité) ont été mesurés trois fois par saison sur une année complète. Les résultats montrent que la transparence de l'eau et la température de l'air sont significativement plus faibles en saison pluvieuse (45,03 cm ; 25,42 °C) qu'en saison sèche (60,42 cm ; 28,25 °C) ($p < 0,001$). À l'inverse, la profondeur moyenne est nettement plus élevée en saison pluvieuse (3,41 m) qu'en saison sèche (2,12 m) ($p < 0,001$). Par ailleurs, la conductivité exerce un effet très significatif ($p < 0,001$) sur la salinité en profondeur, indépendamment de la saison. En surface, la salinité varie de 0 à 3,50 S.m⁻¹ en saison sèche et de 0 à 1,80 S.m⁻¹ en saison pluvieuse. Ces résultats mettent en évidence le rôle déterminant des paramètres hydrologiques et physico-chimiques dans la variabilité saisonnière de la salinité de l'estuaire, offrant ainsi des perspectives utiles pour la gestion durable et la conservation de ce milieu sensible.

Mots clés : Dynamique estuarienne - Variabilité de la salinité - Paramètres hydrologiques -Analyse spatio-temporelle - Bouche du Roy (Bénin)

Spatio-Temporal Dynamics of Hydrological Parameters and Their Influence on the Salinity of the Bouche du Roy Coastal Estuary

Romaine Assogba-Ballè

Laboratoire d'Hydraulique et de Maîtrise de l'Eau (LHME),
Institut National de l'Eau, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Benin

D.M. Maurice Ahouansou

Laboratoire d'Hydraulique et de Maîtrise de l'Eau (LHME),
Institut National de l'Eau, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Benin
Laboratoire du Génie Rural et de Mécanisation Agricole (LGRMA), Faculté
des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Benin
Département d'Aménagement et Gestion de l'Environnement (DAGE),
Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi, Benin

Luc O. Sintondji

Laboratoire d'Hydraulique et de Maîtrise de l'Eau (LHME),
Institut National de l'Eau, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Benin
Unité de Formation et de Recherches en Sciences de la Nature,
Université Nangui Abrogoua, Laboratoire de botanique, Côte d'Ivoire

Abstract

The coastal estuary of the Bouche du Roy represents a dynamic interface between continental and marine waters, playing a crucial role in

hydrological, biological, and ecological exchanges. Owing to its particular salinity regime, it supports key ecosystem functions. To investigate the spatio-temporal dynamics of hydrological parameters and their influence on salinity, a systematic sampling was conducted across thirty-one (31) stations, including six at the estuarine mouths and twenty-five distributed equidistantly along the estuary. Hydrological (current velocity and direction, water depth) and physico-chemical parameters (temperature, salinity, turbidity, dissolved oxygen, and conductivity) were measured three times per season over a full annual cycle. Results reveal that water transparency and air temperature were significantly lower during the rainy season (45.03 cm; 25.42 °C) compared to the dry season (60.42 cm; 28.25 °C) ($p < 0.001$). Conversely, the average water depth was significantly higher in the rainy season (3.41 m) than in the dry season (2.12 m) ($p < 0.001$). Conductivity exerted a highly significant influence ($p < 0.001$) on salinity at depth, regardless of season. At the surface, salinity ranged from 0 to 3.50 S.m⁻¹ in the dry season and from 0 to 1.80 S.m⁻¹ in the rainy season. These findings highlight the strong seasonal variability of hydrological and physico-chemical parameters driving salinity in the Bouche du Roy estuary and provide valuable insights for the sustainable management and conservation of this sensitive ecosystem.

Keywords: Estuary dynamics - Salinity variability - Hydrological parameters – Spatio-temporal analysis - Bouche du Roy (Benin)

Introduction

Les zones côtières d'Afrique représentent la deuxième source d'apport en eau douce vers l'océan Atlantique, jouant un rôle fondamental dans la régulation des processus hydrologiques, écologiques et biogéochimiques. Les estuaires, en particulier, constituent des interfaces dynamiques entre les domaines continental et marin, assurant d'intenses échanges d'eau, de sédiments et de nutriments par l'intermédiaire de leurs embouchures (El Morhit et al., 2012 ; Laïbi et al., 2018 ; Vinh and Ouillon, 2021 ; Garinet et al., 2024). Dans de nombreux cas, le volume des eaux océaniques oscillant dans l'estuaire dépasse celui des apports d'eaux continentales, conférant ainsi à la marée un rôle déterminant dans la dynamique hydrologique et saline des écosystèmes estuariens.

Le littoral béninois est délimité par trois plateaux tabulaires inclinés en pente douce vers le sud : les plateaux de Comé et d'Allada au Bénin, et celui de Vogan-Attitogan au Togo (Yantikoua et al., 2021). L'estuaire côtier de la Bouche du Roy, situé sur cette côte, présente une originalité paysagère remarquable où se rencontrent fleuve et mer, créant un espace à forte valeur écologique et socio-économique. Ce site attire également un intérêt touristique croissant, à travers des activités telles que la pêche aux écrevisses, les balades

en pirogue ou en bateau, ainsi que les visites culturelles des villages voisins. Sur le plan climatique, les alizés océaniques constituent les vents dominants de la côte béninoise, tandis que les alizés de nord-est n'apparaissent que de manière marginale entre novembre et mars (Laïbi, 2011 ; Alassane, 2020).

Cependant, cet équilibre naturel demeure fragile et soumis à de multiples pressions. La diminution des apports d'eau douce, combinée à la dérive littorale, favorise l'ensablement progressif de la passe (Adopo et al., 2008). À cela s'ajoutent les impacts croissants des activités humaines, notamment l'exploitation touristique, le pompage de la nappe phréatique, l'exploitation des mangroves et l'accumulation sédimentaire liée aux aménagements hydrauliques et côtiers (barrage de Nagbéto, digues, ouvrages portuaires). Ces pressions anthropiques renforcent la vulnérabilité de l'estuaire en modifiant sa stabilité géomorphologique et son régime de salinité. Or, la dynamique de la salinité dans un estuaire dépend à la fois du débit fluvial et du rythme des marées, faisant de cet indicateur un paramètre clé de compréhension des interactions continent-océan.

Malgré l'importance écologique et socio-économique des estuaires au Bénin, très peu d'études ont été consacrées à la dynamique océanographique et hydrologique de ces milieux. L'estuaire côtier de la Bouche du Roy reste particulièrement peu documenté en ce qui concerne la variabilité spatio-temporelle de ses paramètres hydrologiques et physico-chimiques, ainsi que leur rôle dans le contrôle de la salinité. Dans cette perspective, la présente étude se fixe pour objectif d'analyser l'évolution spatio-temporelle des paramètres hydrologiques caractérisant la salinité de l'estuaire côtier de la Bouche du Roy. Elle vise à combler une lacune scientifique majeure et à fournir des éléments d'aide à la décision pour la gestion durable et la conservation de cet écosystème sensible.

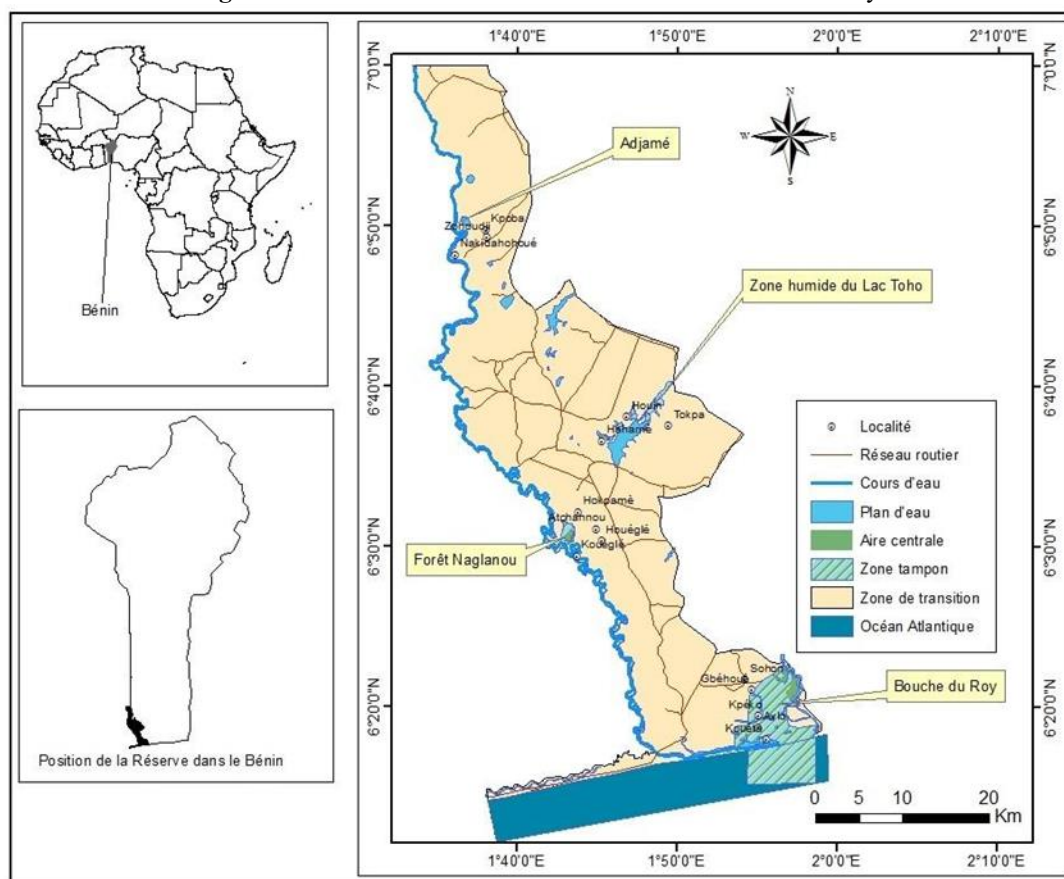
Méthodologie

Milieu d'étude

La présente étude a été conduite dans la zone Ouest du littoral béninois, comprise entre les latitudes 6,27° et 6,29° Nord et les longitudes 1,83° et 1,93° Est (Figure 1). L'estuaire côtier de la Bouche du Roy est situé à l'extrémité sud-ouest du Bénin, dans la commune de Grand-Popo (département du Mono), à proximité de la frontière avec le Togo. Il constitue l'embouchure principale du fleuve Mono, qui prend sa source au Togo et parcourt environ 467 km avant de se jeter dans l'océan Atlantique (Laïbi, 2011). Cette portion de côte s'étend sur environ 23 km, soit près de 19 % du littoral national. Elle est soumise à une marée océanique de type semi-diurne et microtidale, caractérisée par des marnages extrêmes variant de +1,95 m à -0,20 m, avec une amplitude moyenne généralement proche de 1 mètre (Assogba-Ballè, et al., 2021). L'estuaire s'étend sur une zone caractérisée par une forte interaction entre les

eaux continentales et marines, ce qui en fait un écosystème à la fois complexe et vulnérable (Adopo et al., 2008 ; El Morhit et al., 2012).

Figure 1 : Localisation de l'estuaire côtier de la Bouche du Roy



Source : Hadonou-Yovo, et al., 2019

La Bouche du Roy joue un rôle écologique majeur, notamment par la présence de mangroves, de lagunes et d'habitats halieutiques qui constituent des zones de reproduction et de croissance pour de nombreuses espèces aquatiques (Sinsin et Kampmann, 2010). Cette richesse biologique lui a valu d'être inscrite sur la liste des sites Ramsar en 2012, en reconnaissance de son importance internationale pour la conservation des zones humides et de la biodiversité (Ramsar, 2012).

Sur le plan socio-économique, la zone est également un espace de vie et d'activités pour les communautés locales, qui y développent la pêche artisanale, le maraîchage, l'exploitation du bois de mangrove et des activités touristiques. Toutefois, cet équilibre est menacé par les pressions anthropiques (extraction de sable, urbanisation, tourisme non maîtrisé) et par les dynamiques naturelles telles que l'ensablement de la passe, l'érosion côtière

et la variabilité saisonnière de la salinité (Laïbi et al., 2018 ; Yantikoua et al., 2021).

Collecte des données

Dans le cadre de l'analyse spatio-temporelle des paramètres hydrologiques influençant la salinité de l'estuaire côtier de la Bouche du Roy, un échantillonnage systématique a été réalisé. Trente et une (31) stations d'observation ont été retenues (Figure 2), dont six situées au niveau des embouchures et vingt-cinq réparties de manière équidistante le long de l'estuaire.

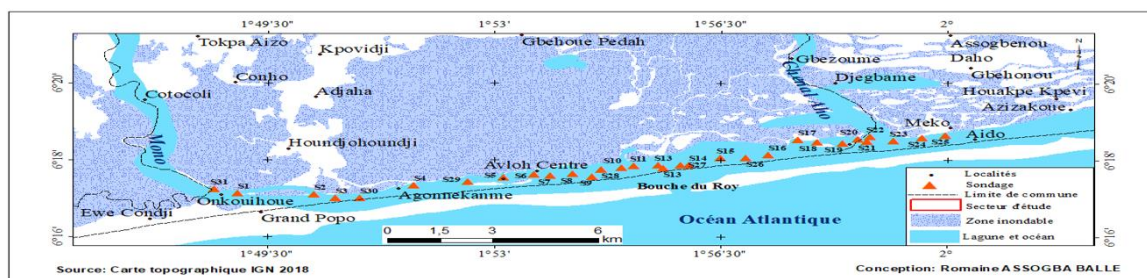


Figure 2 : Localisation des stations d'échantillonnage dans l'estuaire côtier de la Bouche du Roy

Les campagnes de collecte des données ont été effectuées trois fois par saison, sur une période d'un an, afin de couvrir l'ensemble du cycle hydrologique annuel. Les paramètres mesurés comprenaient :

- ✓ hydrologiques : vitesse et direction des courants, hauteur d'eau ;
- ✓ physico-chimiques : température, salinité, turbidité, oxygène dissous et conductivité.

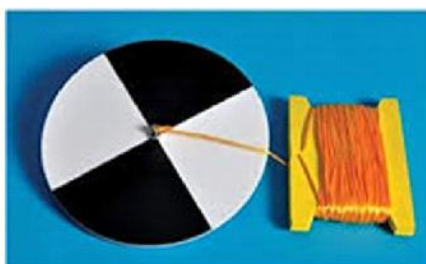
À chaque station, les mesures ont été réalisées à deux profondeurs (surface et fond) et répétées plusieurs fois afin de garantir leur fiabilité. Le matériel utilisé pour les mesures (Figure 3) comprenait : un conductimètre (salinité et conductivité), un courantmètre (vitesse et direction du courant), un disque de Secchi (transparence/turbidité), ainsi qu'un multiparamètre portable (oxygène dissous et température).



Conductimètre



Courantomètre



Disque de Secchi



Multi paramètre

Figure 3 : Appareils ayant servis à mesurer les paramètres

Analyse et traitement des données

En vue de l'analyse et de l'interprétation des résultats, une étude des relations d'interdépendance a été réalisée entre les variables explicatives (vitesse du courant, hauteur d'eau, température, oxygène dissous et conductivité) et la variable expliquée, à savoir la salinité. Cette relation a été explorée à l'aide d'une régression multiple, mise en œuvre avec le logiciel R. La variation spatiale de la salinité a été évaluée par une approche géostatistique reposant sur la méthode du krigeage. Cette technique nécessite au préalable l'analyse de la structure spatiale des données, qui repose sur l'élaboration et l'ajustement d'un modèle de variogramme. Pour ce faire, le logiciel Matlab a été utilisé afin de calculer le variogramme expérimental et d'en déduire le modèle théorique le mieux adapté. Le variogramme expérimental, défini selon Abramowitz et Stegun (1972, cité par Hinvi et al., 2013), a été calculé à partir de la formule suivante :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \frac{1}{2N(h)} \sum_{(i,j) \in S(h)} (Z_i - Z_j)^2$$

Avec :

$\gamma(h)$ = variogramme expérimental pour les couples de distance h ;

$N(h)$ = nombre de couples d'observations séparées par la distance h ;

Z_i et Z_j = valeurs de la salinité respectivement aux stations i et j .

Le modèle de variogramme retenu a été évalué par le critère de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970 cité par Vissin, 2007) dont la formule suit :

$$Nash = 1 - \frac{\sum_1^n (Y_{i^{obs}} - Y_{i^{mod}})^2}{\sum_1^n (Y_{i^{obs}} - Y_{moy})^2}$$

La méthode de krigeage ordinaire est utilisée pour estimer les valeurs de la salinité à des points inconnus. C'est un estimateur sans biais très utilisé en hydrométrie. Cette méthode tient compte de l'influence (poids) des valeurs des stations avoisinant l'endroit inconnu. Une valeur quelconque Z de la salinité en un endroit x est estimée par :

$$Zx = \sum \lambda_i Z_i$$

Où Zx = salinité estimée ; Z_i = salinité d'une station connue ; λ_i = poids d'influence d'une salinité connue. Les λ_i sont déterminés à travers la résolution du système de krigeage qui est le suivant :

$$\begin{cases} K_0 \lambda_0 = k_0 \\ \sigma_{k_0}^2 = \sigma_x^2 - \lambda_0' k_0 \\ \sum_{i=0}^n \lambda_0 = 1 \end{cases}$$

Avec

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \sigma^2 & \text{Cov}(Z_1, Z_2) & \dots & \text{Cov}(Z_1, Z_n) & 1 \\ \text{Cov}(Z_2, Z_1) & \sigma^2 & \dots & \text{Cov}(Z_2, Z_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \text{Cov}(Z_n, Z_1) & \text{Cov}(Z_n, Z_2) & \dots & \sigma^2 & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}}_{K_0} \underbrace{\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix}}_{\lambda_0} = \underbrace{\begin{bmatrix} \text{Cov}(Z_1, Z_0) \\ \text{Cov}(Z_2, Z_0) \\ \vdots \\ \text{Cov}(Z_n, Z_0) \\ 1 \end{bmatrix}}_{k_0}$$

K_0 = matrice des covariances de tous les couples de points

k_0 = matrice des covariances de tous les couples de points contenant Zx

$\sigma_{k_0}^2$ = variance d'estimation du krigeage ordinaire

σ_x^2 = variance de la valeur estimée ; λ_0' = transposée de la matrice λ_0 .

Le logiciel Matlab a été utilisé pour les différents calculs (compte tenu de sa flexibilité). Les cartes d'analyse spatiale sont réalisées avec le même logiciel Matlab. Mais avant, le logiciel ArcGIS 10.2.1 a été utilisé pour générer les fichiers de forme (.shp).

Résultats

Description des paramètres de l'eau de l'estuaire Bouche du Roy et influence de la saison et du niveau

Les Figures 4 et 5 présentent la distribution saisonnière et verticale (surface et profondeur) des principaux paramètres hydrologiques et physico-chimiques mesurés dans l'estuaire. De manière générale, la transparence (Figure 4c) et la température de l'air (Figure 4a) affichent des valeurs moyennes significativement plus faibles en saison pluvieuse (45,03 cm ; 25,42 °C) qu'en saison sèche (60,42 cm ; 28,25 °C) ($p < 0,001$). À l'inverse, la profondeur moyenne de l'eau (Figure 4b) est significativement plus élevée en saison pluvieuse (3,41 m) qu'en saison sèche (2,12 m) ($p < 0,001$), avec des variations notables selon les stations (0,95 – 3,40 m en saison sèche contre 1,80 – 4,51 m en saison pluvieuse).

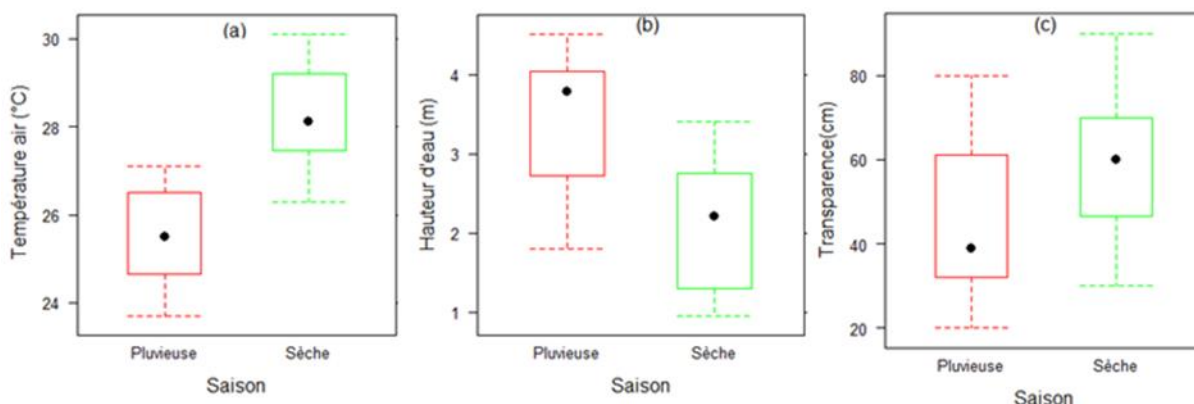


Figure 4: Box plots des valeurs moyennes de la température de l'air en surface (a), de la profondeur de l'eau (b) et de la transparence en surface (c)

La vitesse du courant (Figure 5d) varie également de façon significative ($p < 0,001$) entre saisons et profondeurs : en saison sèche, elle atteint 0,24 m/s en surface et 0,12 m/s en profondeur, contre 0,42 m/s et 0,18 m/s respectivement en saison pluvieuse. De même, la température de l'eau (Figure 5c) est significativement plus élevée en saison sèche (29,09 °C en surface et 28,37 °C en profondeur) qu'en saison pluvieuse (27,43 °C et 26,41 °C).

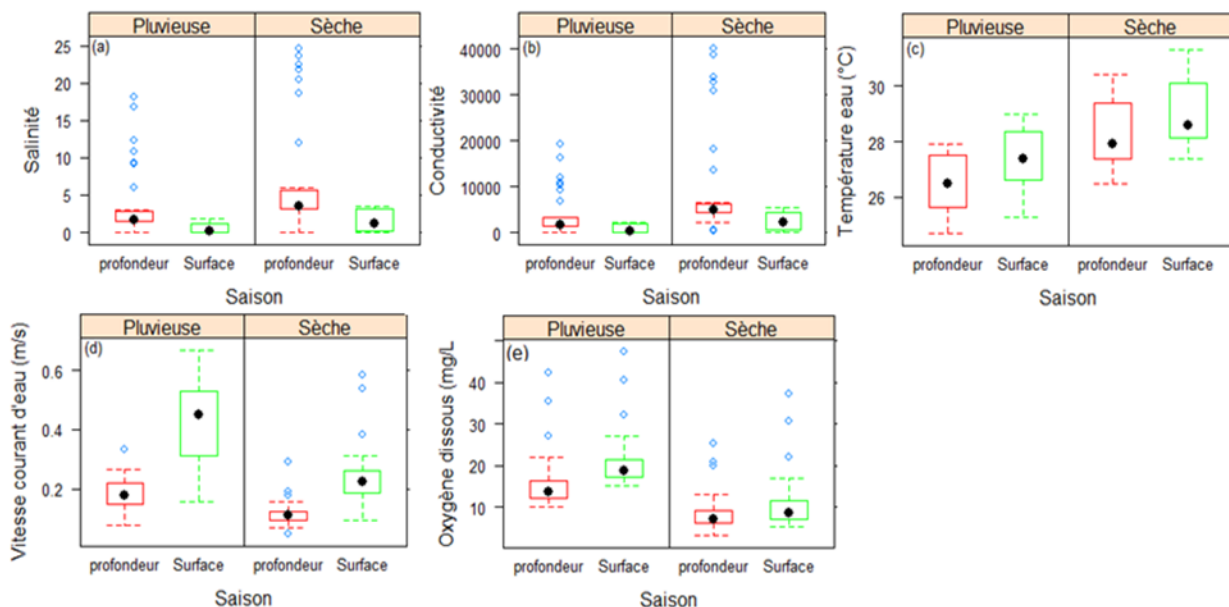


Figure 5 : Box plots des valeurs moyennes de la salinité (a), de la conductivité (b), de la température de l'eau (c), de la vitesse du courant d'eau (d) et de l'oxygène dissous

En ce qui concerne l'oxygène dissous (Figure 5e), aucune différence significative n'a été observée entre la surface (8,84 mg/L) et la profondeur (11,22 mg/L) en saison sèche ($p > 0,05$). En revanche, les écarts sont très marqués en saison pluvieuse (21,22 mg/L en surface contre 16,22 mg/L en profondeur ; $p < 0,001$). La conductivité (Figure 12b) montre une relative homogénéité entre la plupart des conditions (2,53 S.m⁻¹ ; 0,96 S.m⁻¹ ; 3,8S.m⁻¹), à l'exception notable de la profondeur en saison sèche, où une valeur moyenne très élevée est enregistrée (9,70 S.m⁻¹).

La salinité (Figure 5a) révèle une forte variabilité spatio-temporelle. En saison pluvieuse, les valeurs moyennes en surface (0,58) et en profondeur (3,71) sont significativement différentes entre elles ($p < 0,001$), mais comparables à la surface en saison sèche (1,62). La salinité moyenne en profondeur en saison sèche (6,71) est, quant à elle, significativement plus élevée que toutes les autres valeurs ($p < 0,001$), avec des maxima pouvant atteindre 25 en période d'été.

Ces résultats mettent en évidence l'influence combinée des variations saisonnières et de la stratification verticale sur les paramètres hydrologiques et physico-chimiques, et soulignent le rôle déterminant de certains d'entre eux (notamment la conductivité et la profondeur) dans le contrôle de la dynamique de salinité dans l'estuaire.

Relation entre les paramètres pendant la saison pluvieuse

La Figure 6 illustre les relations de corrélation entre les paramètres hydrologiques et physico-chimiques mesurés pendant la saison pluvieuse. En profondeur (Figure 6a), les corrélations entre la conductivité et la température de l'eau, ainsi qu'entre la salinité et la température de l'eau, sont fortes et négatives, indiquant une augmentation de la conductivité lorsque la température diminue et une réduction de la salinité lorsque la température s'élève. En revanche, des corrélations positives très marquées sont observées entre la salinité et la conductivité, entre la salinité et la vitesse du courant, ainsi qu'entre la conductivité et la vitesse du courant. Ces résultats suggèrent que l'augmentation de la salinité est étroitement associée à celle de la conductivité et à l'intensification de la dynamique hydrodynamique.

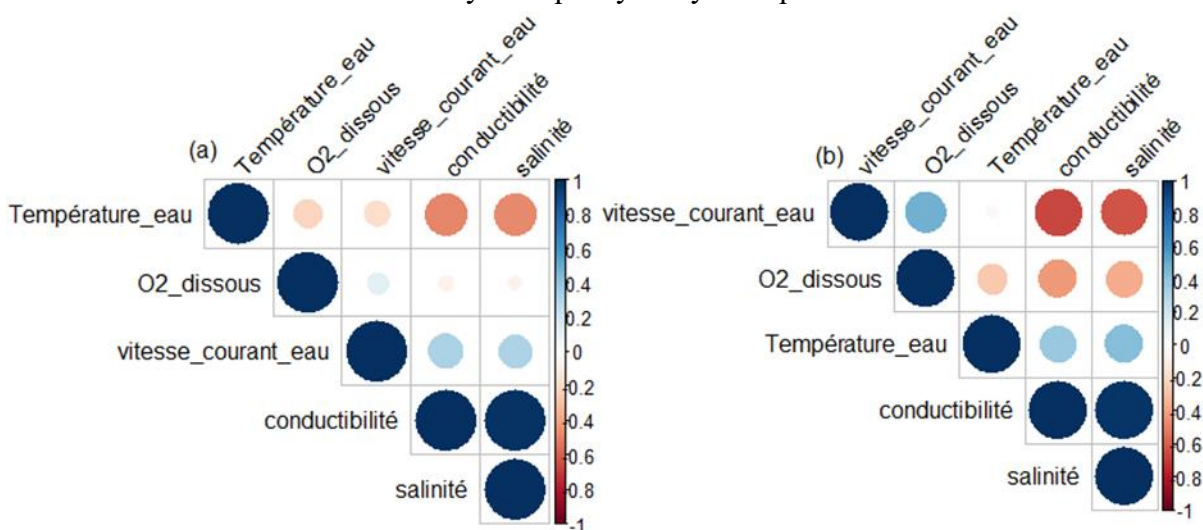


Figure 6 : Corrélogrammes montrant la relation entre les paramètres de l'eau pendant la saison pluvieuse en profondeur (a) et en surface (b)

En surface (Figure 6b), les corrélations les plus fortes sont positives entre l'oxygène dissous et la vitesse du courant, entre la conductivité et la température de l'eau, ainsi qu'entre la salinité et la température de l'eau. Cela traduit respectivement : une augmentation de l'oxygène dissous avec l'accélération du courant, une augmentation de la conductivité avec le réchauffement de l'eau et une élévation de la salinité concomitante à celle de la température. À l'inverse, de fortes corrélations négatives sont observées entre la conductivité et la vitesse du courant, la salinité et la vitesse du courant, ainsi qu'entre la conductivité et l'oxygène dissous, et entre la salinité et l'oxygène dissous. Ces résultats suggèrent une baisse de la salinité et de la conductivité lorsque la vitesse du courant augmente, ainsi qu'une diminution de l'oxygène dissous en présence de fortes valeurs de conductivité et de salinité.

Relation entre les paramètres pendant la saison sèche

La Figure 7 illustre les relations de corrélation entre les paramètres mesurés pendant la saison sèche. En profondeur (Figure 7a), des corrélations fortes et négatives apparaissent entre la conductivité et la température de l'eau, ainsi qu'entre la salinité et la température. Cela traduit une augmentation de la conductivité lorsque la température diminue, et une baisse de la salinité avec l'élévation de la température. À l'inverse, des corrélations positives très élevées sont observées entre la salinité et la conductivité, entre la salinité et la vitesse du courant, ainsi qu'entre la conductivité et la vitesse du courant. Par ailleurs, une corrélation positive notable relie la température de l'eau et l'oxygène dissous, suggérant d'une part une élévation de la salinité concomitante à l'augmentation de la conductivité et de la vitesse du courant, et d'autre part une augmentation de la teneur en oxygène dissous avec le réchauffement de l'eau.

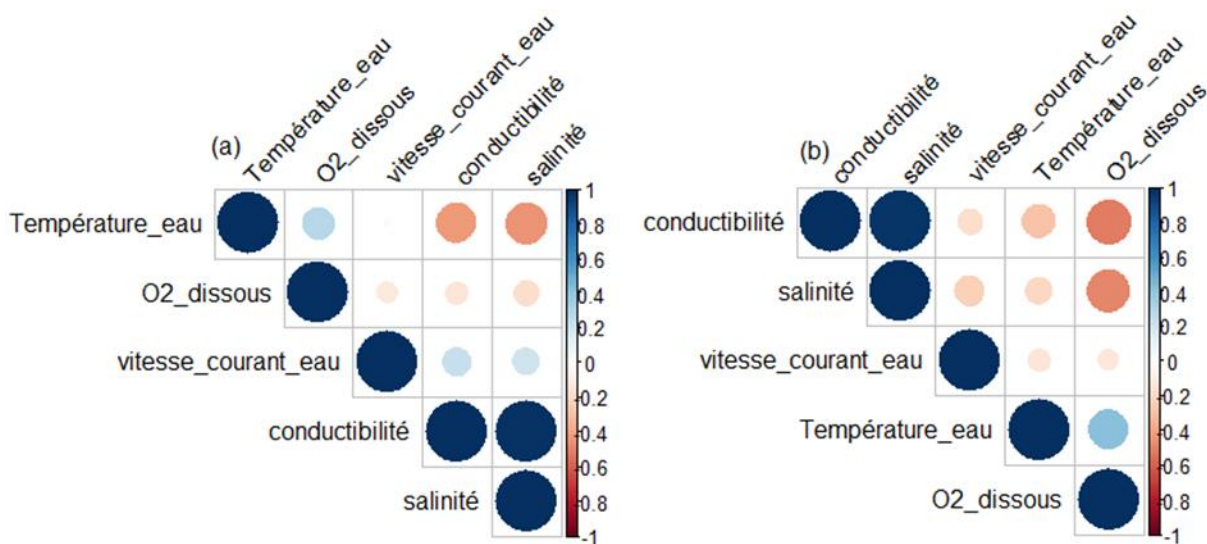


Figure 7: Corrélogramme montrant la corrélation des paramètres de l'eau pendant la saison sèche en profondeur (a) et en surface (b)

En surface (Figure 7b), la salinité et la conductivité présentent une forte corrélation positive, indiquant que l'augmentation de l'une est associée à l'élévation de l'autre. De même, une corrélation positive existe entre la température de l'eau et l'oxygène dissous, traduisant une hausse de l'oxygène dissous lorsque la température augmente. En revanche, des corrélations fortes et négatives apparaissent entre la conductivité et l'oxygène dissous, ainsi qu'entre la salinité et la conductivité. Ces résultats suggèrent une diminution de l'oxygène dissous avec l'augmentation de la salinité et de la conductivité.

Caractérisations des paramètres hydrologiques de l'estuaire côtier de la Bouche du Roy suivant les saisons

Le Tableau 1 présente la distribution des paramètres hydrologiques et physico-chimiques selon les principales régions de l'estuaire. L'analyse révèle des contrastes significatifs entre régions et saisons.

En profondeur, la conductivité moyenne dans la région Ouest se distingue nettement par ses valeurs très élevées, aussi bien en saison sèche ($15,67 \text{ S.m}^{-1}$) qu'en saison pluvieuse ($6,39 \text{ S.m}^{-1}$), comparativement aux autres zones. En surface, les valeurs maximales de conductivité sont enregistrées aux embouchures, indépendamment de la saison.

L'oxygène dissous présente également une variabilité marquée. En saison pluvieuse, la région Ouest se distingue significativement des autres zones, tant en surface qu'en profondeur. En saison sèche, les concentrations y sont homogènes mais différentes de celles relevées ailleurs.

La profondeur de l'eau varie de manière hautement significative entre les régions. Les valeurs les plus élevées sont observées dans la région Ouest en saison pluvieuse, tandis que les profondeurs mesurées aux embouchures, à l'Est en saison pluvieuse et à l'Ouest en saison sèche sont statistiquement comparables.

Concernant la salinité, aucune différence significative n'a été observée en profondeur, quelle que soit la saison ou la localisation. En revanche, en surface, une forte hétérogénéité a été mise en évidence : les valeurs les plus élevées sont relevées au Centre en saison sèche, tandis que d'autres regroupements similaires apparaissent entre l'Est et le Centre en saison pluvieuse d'une part, et entre l'Ouest en saison sèche, le Centre et l'Est en saison pluvieuse d'autre part.

La température de l'eau présente des différences très marquées. En surface comme en profondeur, les valeurs maximales sont relevées à l'Est en saison sèche, tandis que celles de l'Ouest et du Centre en saison sèche restent similaires mais distinctes de celles de la saison pluvieuse, qui varient elles-mêmes entre régions.

La transparence de l'eau montre une forte différenciation spatiale. Les valeurs au Centre et à l'Est en saison sèche sont comparables et significativement supérieures à celles des autres zones, à l'exception de l'Ouest en saison pluvieuse, statistiquement isolé du reste.

Enfin, la vitesse du courant d'eau varie significativement dans l'estuaire. En profondeur, les valeurs diffèrent entre saisons mais restent homogènes au sein de chaque période. En surface, la vitesse est plus élevée au Centre et à l'Est en saison pluvieuse, avec des valeurs similaires entre elles mais distinctes de toutes les autres, qui restent comparables quelle que soit la saison.

Tableau 1 : Statistiques descriptives (moyenne et CV) des différents paramètres mesurés suivant les régions et les saisons

Paramètres		Saison sèche						Saison pluvieuse						Prob
		Ouest		Embouchure		Est		Ouest		Embouchure		Est		
Conductivité en profondeur	Moy	15673,70	a	7005,27	b	6698,83	b	6386,45	b	3020,64	b	2257,42	b	0,022
	CV (%)	105,87		62,16		138,50		109,13		80,50		145,90		
Conductivité en surface	Moy	722,15	cd	4179,27	a	2535,60	b	222,60	d	1621,27	bc	962,30	cd	<0,001
	CV (%)	92,04		22,66		75,24		71,97		41,09		110,56		
O2 dissous en profondeur (mg/L)	Moy	13,17	b	5,96	c	7,68	c	21,73	a	12,45	b	14,85	b	<0,001
	CV (%)	48,54		28,10		16,27		45,88		11,95		10,43		
O2 dissous en surface (mg/L)	Moy	16,72	b	7,36	c	9,95	c	26,73	a	17,45	b	19,85	b	<0,001
	CV (%)	59,54		16,99		15,27		37,29		8,52		07,80		
Profondeur de l'eau (m)	Moy	2,62	b	1,93	c	1,82	c	4,15	a	3,24	b	02,85	b	<0,001
	CV (%)	22,74		31,84		42,55		6,19		23,09		28,93		
Salinité en profondeur	Moy	10,22	a	5,69	a	4,33	a	6,21	a	2,85	a	02,17	a	0,087
	CV (%)	102,56		83,93		138,24		111,51		83,93		138,24		
Salinité en surface	Moy	0,32	c	2,72	a	1,72	b	0,04	c	0,98	bc	0,67	c	<0,001
	CV (%)	114,22		30,65		85,06		149,38		54,95		123,41		
Température de l'air en surface (°C)	Moy	27,42	b	27,78	b	29,61	a	24,48	e	25,61	d	26,16	c	<0,001
	CV (%)	2,07		1,74		1,29		2,18		2,65		2,94		
Température de l'eau en profondeur (°C)	Moy	28,21	b	27,56	bc	29,41	a	25,48	e	26,61	d	27,11	cd	<0,001
	CV (%)	4,81		1,66		0,94		2,10		2,55		2,66		
Température de l'eau en surface (°C)	Moye	28,97	b	28,28	bc	30,11	a	26,36	d	27,56	c	28,36	bc	<0,001
	CV (%)	4,79		1,48		0,92		1,75		3,36		1,13		
Transparence en surface (cm)	Moy	50,30	b	69,09	a	61,00	ab	31,50	c	51,00	b	52,00	b	<0,001
	CV (%)	21,30		19,71		32,33		15,31		27,26		33,34		
Vitesse du courant d'eau en profondeur (m/s)	Moy	0,11	b	0,11	b	0,13	b	0,20	a	0,16	ab	0,20	a	<0,001
	CV (%)	21,57		21,12		51,34		24,51		31,66		27,65		
Vitesse du courant d'eau en surface (m/s)	Moy	0,23	b	0,24	b	0,26	b	0,51	a	0,32	b	0,45	a	<0,001
	CV (%)	17,49		42,44		51,34		14,94		31,66		30,18		

Relations d'interdépendance entre la salinité et les paramètres hydrologiques

Le Tableau 2 présente les résultats de la régression multiple entre la salinité (variable dépendante) et les principaux paramètres hydrologiques et physico-chimiques (variables explicatives). L'analyse montre que, en profondeur, la conductivité est le facteur prédominant expliquant la variabilité de la salinité. Cet effet est hautement significatif (Prob. < 0,001) aussi bien en saison sèche qu'en saison pluvieuse, indiquant que la conductivité contrôle de manière quasi-exclusive la dynamique de la salinité à ce niveau.

Tableau 2 : Effet des paramètres significatifs sur la salinité en surface et en profondeur

	Coefficient	Erreur type	Valeur de t	Prob
En surface (saison sèche)				
_cste	-2,29300	1,44900	-1,58	0,125
Vitesse du courant	-0,77790	0,52410	-1,48	0,019
Température de l'eau	0,07824	0,04786	1,64	0,011
Conductibilité	0,00072	0,00003	25,30	< 0,001
En surface (saison pluvieuse)				
_cste	-0,46216	0,12348	-3,74	0,001
Transparence	0,00574	0,00217	2,65	0,013
O2 dissous	0,00633	0,00367	1,72	0,009
Conductibilité	0,00068	0,00004	17,54	< 0,001
En profondeur (saison sèche)				
_cste	0,41360	0,34980	1,18	0,247
Conductibilité	0,00065	0,00002	28,42	< 0,001
En profondeur (saison pluvieuse)				
_cste	-0,02563	0,17690	-0,15	0,886
Conductibilité	0,00097	0,00003	34,31	< 0,001

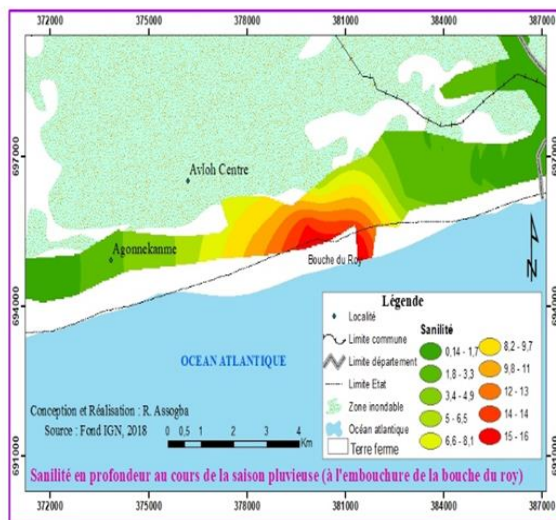
En surface, les déterminants de la salinité varient selon la saison. Pendant la saison sèche, la salinité est significativement influencée non seulement par la conductivité, mais également par la vitesse du courant et la température de l'eau, traduisant une interaction entre forçages hydrodynamiques et thermiques. En revanche, pendant la saison pluvieuse, la salinité de surface est principalement expliquée par la conductivité, la teneur en oxygène dissous et la transparence de l'eau, soulignant l'importance accrue des processus biogéochimiques et de la turbidité pendant cette période.

Ainsi, la conductivité apparaît comme le déterminant majeur de la salinité dans l'ensemble de l'estuaire, tandis que d'autres paramètres (hydrodynamiques, thermiques ou biogéochimiques) interviennent de façon secondaire et saisonnièrement différenciée.

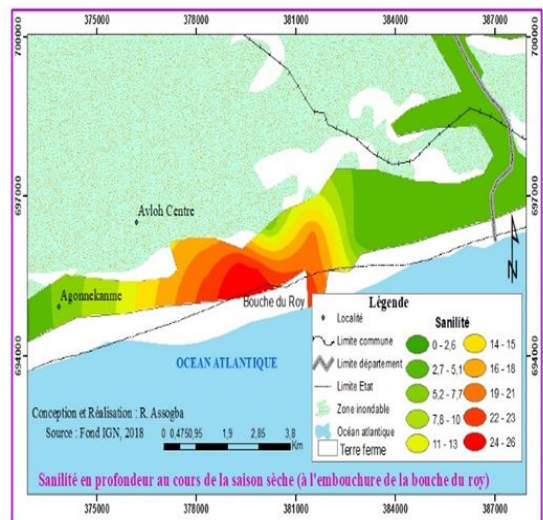
Répartition spatiale de la salinité dans l'estuaire

Les Figures 8, 9 et 10 présentent la distribution spatiale de la salinité en surface et en profondeur à l'embouchure, à l'Ouest et à l'Est de la Bouche du Roy, en saisons sèche et pluvieuse.

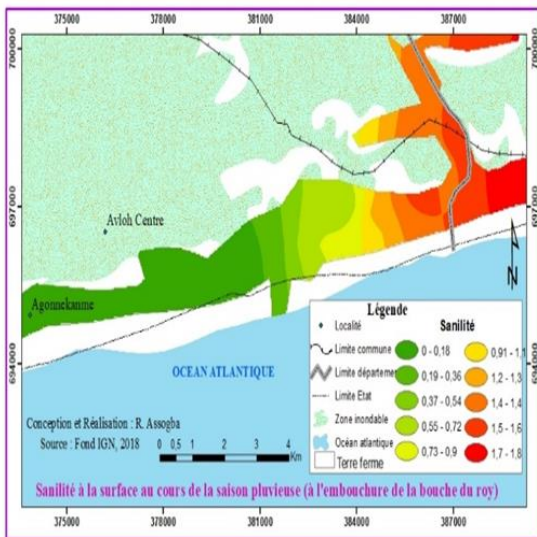
À l'embouchure (Figure 8), la salinité en profondeur atteint des valeurs élevées, comprises entre 15 et 16 S.m⁻¹ en saison pluvieuse (Figure 8A) et jusqu'à 24–26 S.m⁻¹ en saison sèche (Figure 8B). En surface, les valeurs maximales sont respectivement de 1,7–1,8 S.m⁻¹ en saison pluvieuse (Figure 8C) et de 3,2–3,5 S.m⁻¹ en saison sèche (Figure 8D). Ces résultats indiquent une salinité nettement plus forte en saison sèche, et plus marquée en profondeur qu'en surface.



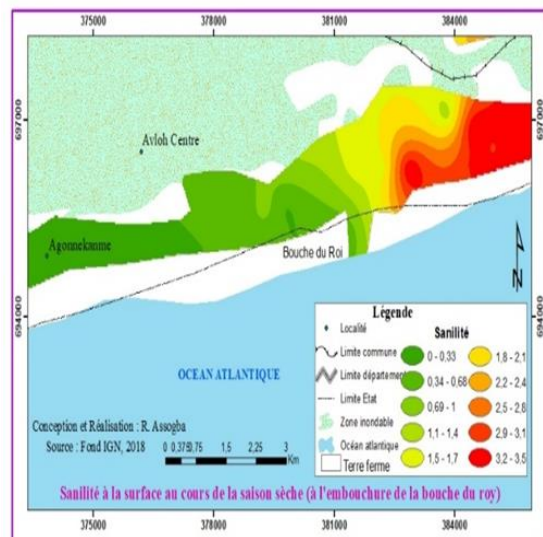
(A) Variation en profondeur de la salinité en saison pluvieuse



(B) Variation en profondeur de la salinité en saison sèche



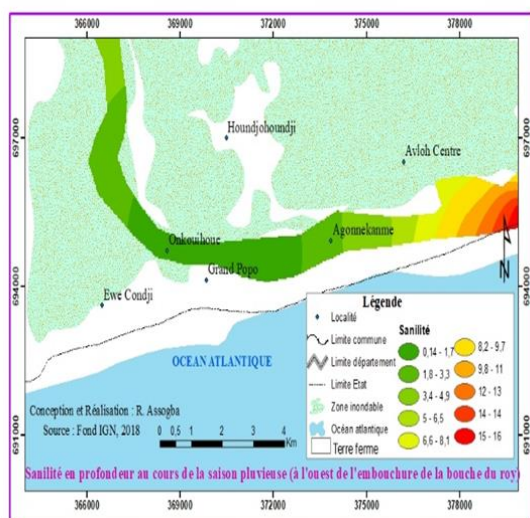
(C) Variation en surface de la salinité en saison pluvieuse



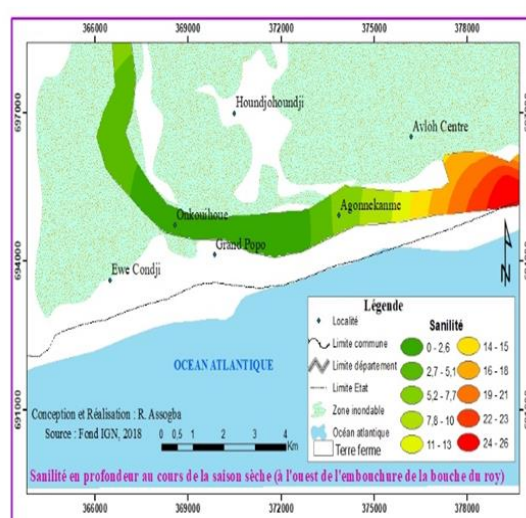
(D) Variation en surface de la salinité en saison sèche

Figure 8 : Variation de la salinité en profondeur et en surface au cours des saisons sèche et pluvieuse à l'embouchure de la bouche du Roy

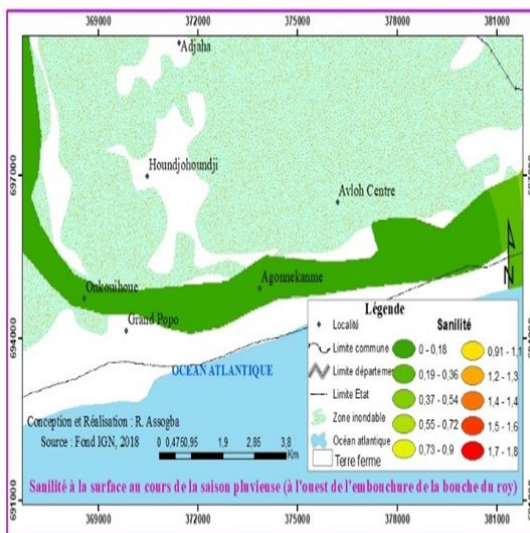
À l'Ouest de l'embouchure (Figure 9), les concentrations suivent la même tendance. En profondeur, la salinité varie de 15–16 S.m⁻¹ en saison pluvieuse (Figure 9 A) à 24–26 S.m⁻¹ en saison sèche (Figure 9B). En surface, les valeurs maximales sont plus faibles, oscillant entre 0,37–0,54 S.m⁻¹ en saison pluvieuse (Figure 9C) et 0,69–1,0 S.m⁻¹ en saison sèche (Figure 9D). La valeur la plus élevée (26 S.m⁻¹) est enregistrée en profondeur durant la saison sèche.



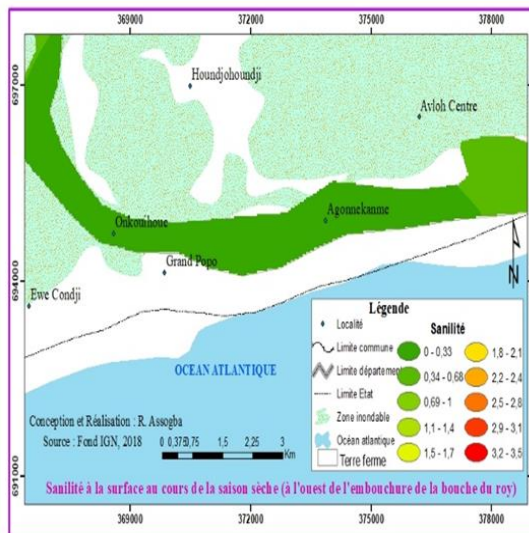
(A) Variation en profondeur de la salinité en saison pluvieuse (Ouest-Embouchure)



(B) Variation en profondeur de la salinité en saison sèche (Ouest-Embouchure)



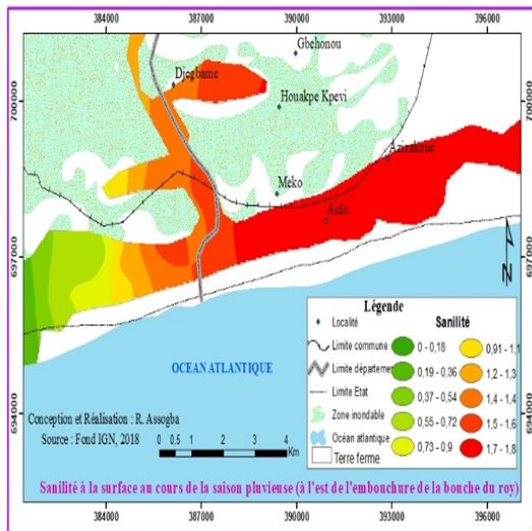
(C) Variation en surface de la salinité en saison pluvieuse (Ouest-Embouchure)



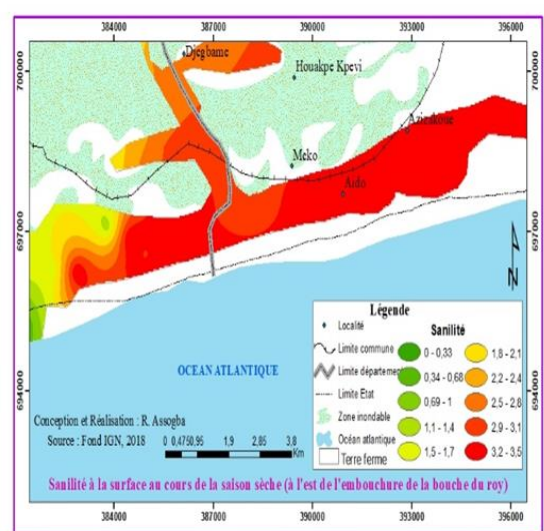
(D) Variation en surface de la salinité en saison sèche (Ouest-Embouchure)

Figure 9 : Variation de la salinité en profondeur et en surface au cours des saisons sèche et pluvieuse à l'Ouest de l'embouchure de la bouche du Roy

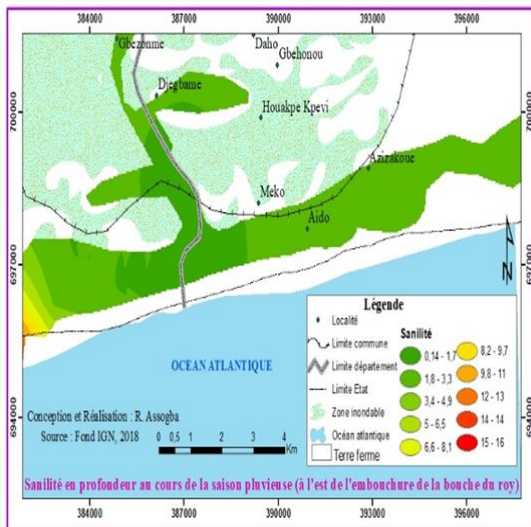
À l'Est de l'embouchure (Figure 10), la salinité de surface atteint $1,7-1,8 \text{ S.m}^{-1}$ en saison pluvieuse (Figure 10A) et $3,2-3,6 \text{ S.m}^{-1}$ en saison sèche (Figure 10B), avec des maxima localisés notamment à Azizakoué et Aïdo. En profondeur, les valeurs varient entre $5-6,5 \text{ S.m}^{-1}$ en saison pluvieuse (Figure 10C) et $19-21 \text{ S.m}^{-1}$ en saison sèche (Figure 10D). Les concentrations maximales sont donc observées en profondeur et en saison sèche, confirmant la tendance générale de l'estuaire.



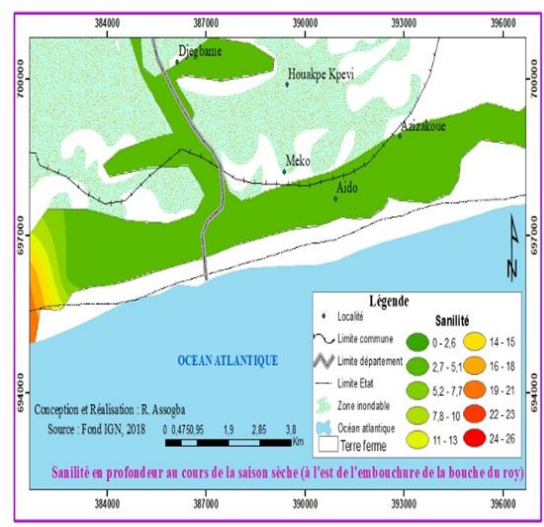
(A) Variation en profondeur de la salinité en saison pluvieuse (Est-Embouchure)



(B) Variation en profondeur de la salinité en saison sèche (Est-Embouchure)



(C) Variation en surface de la salinité en saison pluvieuse (Est-Embouchure)



(D) Variation en surface de la salinité en saison sèche (Est-Embouchure)

Figure 10 : Variation de la salinité en profondeur et en surface au cours des saisons sèche et pluvieuse à l'Est de l'embouchure de la bouche du Roy

De manière synthétique, les cartes d'analyse spatiale mettent en évidence une forte variabilité saisonnière et spatiale de la salinité. En surface, elle varie de 0 à 3,6 S.m⁻¹ en saison sèche contre 0 à 1,8 S.m⁻¹ en saison pluvieuse, avec des pics notables entre Kouéta et Méko, particulièrement à Djondji. En profondeur, les valeurs varient de 0 à 26 S.m⁻¹ en saison sèche et de 0,14 à 16 S.m⁻¹ en saison pluvieuse, avec des maxima enregistrés de Sôlito à Méko, notamment à Avlo. Ces résultats confirment que la salinité est plus élevée en saison sèche qu'en saison pluvieuse, et systématiquement plus importante en profondeur qu'en surface.

Discussion

Les résultats obtenus montrent que la transparence et la température de l'eau présentent des valeurs moyennes significativement plus faibles en saison pluvieuse qu'en saison sèche. Cette tendance reflète l'influence combinée des précipitations, des apports fluviaux et de la couverture nuageuse sur les dynamiques hydrologiques et thermiques de l'estuaire. En effet, l'augmentation du débit fluvial et le charriage de matières en suspension limitent la pénétration de la lumière et réduisent la transparence, tandis que la diminution de l'insolation directe en saison des pluies contribue à la baisse des températures de l'eau. Ces résultats corroborent les observations de Komoé (2010) dans la lagune de Grand-Lahou en Côte d'Ivoire, où la turbidité en période de crue est également liée à l'apport massif de sédiments.

Les corrélations négatives observées entre la conductivité et la température de l'eau d'une part, et entre la salinité et la température d'autre part, traduisent une relation inverse entre ces paramètres : la conductivité augmente lorsque la température diminue, et la salinité décroît lorsque la température s'élève. Ce constat souligne la complexité des interactions entre forçages hydrodynamiques (marées, débits fluviaux) et processus physiques locaux (stratification thermique, mélange vertical). Des tendances similaires ont été rapportées par El Morhit et al. (2012) dans d'autres estuaires ouest-africains, confirmant que la variabilité saisonnière des paramètres hydrologiques est fortement conditionnée par la position géographique et l'intensité des échanges continent-océan.

La saison sèche se distingue par des températures élevées, associées à une forte insolation et à une transparence accrue. Cette combinaison favorise une photosynthèse intense, susceptible d'expliquer les teneurs élevées en oxygène dissous observées dans l'estuaire (Komoé et al., 2009). En revanche, en saison pluvieuse, la forte turbidité limite la pénétration lumineuse, réduisant ainsi la production primaire et les concentrations d'oxygène dissous. L'influence des marées accentue ces contrastes saisonniers, car l'intrusion saline est renforcée à l'étiage, lorsque la dilution par les eaux fluviales est moindre (Groga, 2012 ; Diop et al., 2024).

L'analyse des amplitudes de salinité confirme cette dynamique : en surface, elle varie de 0 à $3,50 \text{ S.m}^{-1}$ en saison sèche contre 0 à $1,84 \text{ S.m}^{-1}$ en saison pluvieuse, tandis qu'en profondeur les valeurs atteignent $24,60 \text{ S.m}^{-1}$ en saison sèche et $18,20 \text{ S.m}^{-1}$ en saison pluvieuse. Ces contrastes verticaux révèlent une stratification saline marquée, typique des estuaires soumis à une forte intrusion marine. Les observations concordent avec celles de Kouassi et al. (2005) dans les lagunes ivoiriennes, où l'évaporation et l'influence océanique accentuent la salinité en saison sèche, donnant aux eaux un caractère plus basique.

Les faibles températures mesurées en saison pluvieuse pourraient par ailleurs être attribuées à des phénomènes locaux d'upwelling, renforcés par la couverture nuageuse qui limite l'apport radiatif. L'ensemble de ces résultats s'accorde avec les travaux d'Issola et al. (2008), qui soulignent que la faible variation saisonnière de certains paramètres dans les estuaires résulte de l'action combinée de l'hydrodynamisme, des marées, des crues et des apports de ruissellement.

Enfin, la comparaison entre surface et profondeur révèle une stratification thermique au sein de la colonne d'eau, les eaux de surface étant plus chaudes que celles de fond. Cette stratification, couplée aux gradients de salinité, met en évidence la coexistence de masses d'eau aux caractéristiques physico-chimiques distinctes, témoignant de l'importance des processus de mélange vertical et de renouvellement des masses d'eau dans le fonctionnement de l'estuaire côtier de la Bouche du Roy.

Conclusion

Le renouvellement des estuaires par les intrusions marines constitue un moteur essentiel de la circulation intra-estuarienne et conditionne fortement la dynamique hydrologique locale. Cette étude, consacrée à la caractérisation des paramètres hydrologiques de l'estuaire côtier de la Bouche du Roy, met en évidence plusieurs tendances majeures.

D'une part, la profondeur moyenne de l'eau est significativement plus élevée en saison pluvieuse qu'en saison sèche, traduisant l'influence directe des apports fluviaux et des précipitations. D'autre part, les résultats montrent que la conductivité augmente lorsque la température diminue, tandis que la salinité décroît avec l'élévation de la température, révélant des interactions complexes entre forçages thermiques et hydrodynamiques.

La salinité se révèle globalement plus forte en saison sèche qu'en saison pluvieuse, aussi bien en surface qu'en profondeur. Les variations verticales sont particulièrement marquées : en saison sèche, les valeurs atteignent jusqu'à $24,6 \text{ S.m}^{-1}$ en profondeur, contre une moyenne de $1,62 \text{ S.m}^{-1}$ en surface. Ce contraste témoigne d'une stratification saline nette, renforcée par l'intrusion marine en période d'étiage.

Ces résultats confirment que la salinité, facteur clé du fonctionnement estuarien, est déterminée conjointement par l'amplitude des marées et les débits fluviaux. L'estuaire côtier de la Bouche du Roy apparaît ainsi comme un milieu fortement variable, où les processus saisonniers et verticaux interagissent pour structurer les dynamiques physico-chimiques. Ces observations fournissent une base scientifique essentielle pour la compréhension des estuaires ouest-africains et ouvrent des perspectives pour leur gestion durable face aux pressions anthropiques et au changement climatique.

Conflit d'intérêts : Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

Disponibilité des données : Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

Déclaration de financement : Cette étude a été financée par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique (Programme de bourse doctorale MESRS) du Bénin.

References:

1. Abramowitz, M. and Stegun, I.A., 1972. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. National Bureau of Standards Applied Mathematics Series 55. Tenth Printing.
2. Adopo, K.L., Kouassi, K.L., Wognin, A.V.I., Monde, S. and Aka, K., 2008. Caractérisation des sédiments et morphologie de l'embouchure du fleuve Comoé (Grand-Bassam, Côte d'Ivoire). *Revue Paralia*, 1, pp.2-1.
3. Alassane, A. 2020. Vulnérabilité biophysique de la zone côtière du secteur Grand-Popo, Ouidah face aux changements climatiques (Bénin) [Mémoire de Master]. Université d'Abomey-Calavi
4. Assogba Balle, G.R., Maurice Ahouansou, D.M., Sintondji, L.C. and Agbossou, E.K., 2021. Analyses of short-and long-term shoreline trends of the southwest Benin coast. *Journal of Coastal Research*, 37(2), pp.316-325.
5. Diop, P.S , Brenon, I., & Niang, A.F, 2024. Evolution de la salinité dans l'estuaire de la Casamance (Sénégal). XVIIIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil Anglet 2024, Centre Français du Littoral, Jun 2024, Anglet (France), France. pp.291-302, {10.5150/jngcgc.2024.031}. {hal-04696731}
6. El Morhit, M., Fekhaoui, M., Serghini, A., El Blidi, S., El Abidi, A., Bennaakam, R., Yahyaoui, A. and Jbilou, M., 2008. Impact de l'aménagement hydraulique sur la qualité des eaux et des sédiments de

- l'estuaire du Loukkos (côte atlantique, Maroc). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*, 30, pp.39-47.
7. Garinet, A., Herrmann, M., Marsaleix, P., Pénicaud, J., 2024. Spurious numerical mixing under strong tidal forcing: a case study in the south-east Asian seas using the Symphonie model (v3.1.2). *Geoscientific Model Development*, 17 (18). doi:10.5194/gmd-17-6967-2024
 8. Grogga, N., 2012. Structure, fonctionnement et dynamique du phytoplancton dans le lac de Taabo (Côte d'Ivoire) (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT), 224 p
 9. Hadonou-Yovo, A.G., Houessou, L.G., Lougbegnon, T.O., Adebi, Y., Sinasson, G.K.S., Semevo, D.F., Lange, U. and Boko, M., 2019. Diversité et formes d'utilisation des espèces ligneuses de la Réserve de biosphère du Mono (Bénin). *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, 19(2).
 10. Hinvi, L.C., Sohoul, Z., Agadjihouédé, H., Laleye, P. and Sinsin, B., 2013. Domestication de *Portunus validus* et *Callinectes amnicola* au Bénin. *Journal de la Recherche Scientifique de l'Université de Lomé (Togo), série (A)*, 15(2), pp.13-22.
 11. Issola, Y., Kouassi, A.M., Dongui, B. and Biemi, J., 2008. Caractéristiques physico-chimiques d'une lagune côtière tropicale: lagune de Fresco (Côte d'Ivoire). *Afrique science: revue internationale des sciences et technologie*, 4(3).
 12. Kouassi, A.M., Tidou, A.S. and Kamenan, A., 2005. Caractéristiques hydrochimiques et microbiologiques des eaux de la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). Partie I: Variabilité saisonnière des paramètres hydrochimiques. *Agronomie africaine*, 17(2), pp.117-136.
 13. Komoé, K., 2010. Distribution du phytoplancton dans le complexe lagunaire de Grand-Lahou en Côte d'Ivoire (Doctoral dissertation, Thèse de Doctorat. Université Abidjan Cocody), 282 p.
 14. Laïbi, R.A., 2011, September. Dynamique actuelle d'une embouchure fluviale estuarienne à flèche sableuse, la Bouche du Roi, Bénin, Golfe de Guinée: caractérisation hydrosédimentaire et géomorphologique. Littoral. Thèse de doctorat. 307p.
 15. Laïbi, R., Antoine, G., Anthony, E.J. and Lucien-Marc, O., 2012. Apport des séries d'images LANDSAT dans l'étude de la dynamique spatio-temporelle de l'embouchure de l'estuaire des fleuves Mono et Couffo au Bénin, avant et après la construction du barrage de Nangbéto sur le Mono. *Teledetection*, 10(4), pp.179-198.
 16. Maryse, A.N.G., Kagoyire, K.A. and Adingra, A.A., 2009. Seasonal distribution of phytoplankton in Grand-Lahou lagoon (Côte d'Ivoire). *Eur J Sci Res*, 26, pp.329-341.

17. Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), pp.282-290.
18. Vissin, E., Houndenou, C. and Pérard, J., 2007. Sécheresse pluviométrique et tarissement dans le bassin de la Mékrou (Bénin, Afrique de l'Ouest). In *XXème Colloque International de l'AIC* (p. xx).
19. Vinh Vu Duy, Sylvain Ouillon. 2021. « La double structure du maximum de turbidité estuarienne dans l'estuaire tropical mésotidal de Cam-Nam Trieu, Vietnam ». *Marine Geology* , 442, 106670.
20. Yantikoua, S., Laïbi, R., Adechina, R., Kaki, C., Mama, D. and Laleye, P., 2021. Dynamique hydrologique et évolution morpho sédimentaire du lac Ahémé au Sud-Ouest du Bénin.