

IMAGERIE SATELLITAIRE ET ANALYSE SPATIALE DES PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES POUR L'ÉTUDE DE LA DYNAMIQUE DE LA MANGROVE DANS L'ESTUAIRE DU SALOUM

**Dome TINE^{1*}, Mouhamadou Moustapha Mbacké NDOUR²
et Charles DIEDHIOU³**

¹ Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, Département de Géographie,
Laboratoire de Télédétection Appliquée (LTA), Dakar, Sénégal

² Université Iba Der Thiam de Thiès, Unité de Formation et de
Recherches-Sciences de l'Ingénieur, Thiès, Sénégal

³ Institut Universitaire de Technologie, Laboratoire de Télédétection
Appliquée (LTA), Sénégal

(reçu le 23 Juillet 2025 ; accepté le 20 Novembre 2025)

* Correspondance, e-mail : dometine85@gmail.com

RÉSUMÉ

La baisse du niveau de la mer et une variabilité climatique contrastée entraînent une menace croissante pour les ressources végétales des pays sahéliens côtiers. C'est le cas des mangroves estuariennes du Sine-Saloum, au Sénégal, qui constituent une ceinture verte protectrice. L'objectif de cette étude est d'analyser l'évolution de la mangrove dans l'estuaire du Saloum face aux effets du changement climatique. La méthodologie adoptée repose sur une cartographie diachronique à partir d'images satellitaires Landsat (1972, 1986, 2010, 2021) et sur une analyse des paramètres physiques et chimiques (pH et conductivité électrique) des eaux souterraines de l'espace étudié. Les résultats montrent qu'entre 1972 et 2021, les superficies de la mangrove sont passées de 17,87 % à 15,7 %, soit une réduction de 2,17 % de la superficie totale de l'estuaire. Cependant, la densité de la mangrove s'est légèrement améliorée, avec un NDVI maximal passant de 0,43 en 1972 à 0,64 en 1986, avant de redescendre à 0,57 en 2021. L'analyse des paramètres physiques et chimiques montre une forte salinité des eaux souterraines au niveau de l'estuaire, avec une conductivité électrique supérieure à 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Mots-clés : *changement climatique, mangrove, Landsat, pluviométrie, Estuaire, Saloum.*

ABSTRACT

Satellite imagery and spatial analysis of physical and chemical parameters for studying the dynamics of mangroves in the Saloum estuary

The decline in sea level and contrasting climate variability are creating an increasing threat to plant resources in coastal Sahelian countries. This is the case for the estuarine mangroves of the Sine-Saloum in Senegal, which form a protective green belt. The objective of this study is to analyse the evolution of the mangrove in the Saloum estuary in response to the effects of climate change. The adopted methodology is based on diachronic mapping using Landsat satellite images (1972, 1986, 2010, 2021) and on an analysis of the physical and chemical parameters (pH and electrical conductivity) of groundwater in the study area. The results show that between 1972 and 2021, mangrove areas decreased from 17,87 % to 15,7 %, representing a reduction of 2,17 % of the estuary's total area. However, mangrove density slightly improved, with the maximum NDVI increasing from 0,43 in 1972 to 0.64 in 1986, before dropping to 0,57 in 2021. The analysis of physical and chemical parameters reveals high salinity in the estuary's groundwater, with electrical conductivity exceeding 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Keywords : *climate change, mangroves, Landsat, rainfall, estuary, Saloum.*

I - INTRODUCTION

Les zones estuariennes et lagunaires des régions intertropicales abritent des formations littorales spécifiques, telles que les mangroves, les marais lacustres et les terres adjacentes soumises à des inondations périodiques. Ces écosystèmes se caractérisent par une grande richesse et une diversité biologique remarquables. Les mangroves constituent des habitats essentiels, offrant des ressources halieutiques abondantes (poissons, crevettes, huîtres, etc.) et servant également de sources de bois de chauffe et de bois d'œuvre. Elle offre une multitude de fonctions engendrant de nombreuses activités et stratégies d'exploitation, en rapport avec les besoins vitaux des populations dans un environnement naturellement instable [1]. L'estuaire du Saloum est caractérisé par des formations végétales de mangrove qui jouent un rôle protecteur du littoral contre l'érosion [1 - 3] et servent d'abris à la faune sauvage, aux poissons, aux crustacées et aux mollusques [4] exploités dans le pays. Malgré tous ces avantages, les mangroves demeurent des écosystèmes côtiers très fragiles et parmi les plus menacés au monde, en particulier en Afrique de l'Ouest [5]. Ces menaces proviennent aussi bien des phénomènes naturels que des activités de l'homme. Il existe néanmoins des initiatives, c'est ainsi que

dans les Rivières du Sud, les initiatives étatiques, locales, d'ONG et de partenaires se multiplient pour conserver et sauvegarder ces forêts. Le littoral sénégalais est soumis à des phénomènes naturels tels que les marées et courants qui interviennent dans la délimitation de l'estuaire et participent à la dynamique littorale. Le changement climatique, marqué notamment par la diminution des précipitations depuis les années 1970 et le réchauffement global de la planète, a favorisé une augmentation de l'évaporation par rapport au drainage, entraînant ainsi l'extension des terres salées. Une autre menace associée aux changements climatiques est la montée du niveau marin. Bien qu'adaptée aux milieux saumâtres, la mangrove ne peut jouer un rôle d'atténuation que pendant une courte période face à une montée rapide et importante du niveau de la mer [6]. Les changements climatiques récents se manifestent de diverses manières dans l'écosystème des mangroves des Rivières du Sud. La salinité des eaux, notamment dans la partie nord de cette zone, a connu des modifications importantes au cours des dernières années. Dans certains cours d'eau, la succession d'années sèches a entraîné un recul marqué des limites tidales, tandis que les fronts de salinité ont parfois progressé loin en amont, comme c'est le cas dans les estuaires du Saloum et de la Casamance. Des cas-limites d'hypersalinité sont même décrits dans les estuaires du Saloum et de la Casamance [7]. L'objectif de cette étude est d'analyser l'évolution de la mangrove de l'estuaire du Saloum en utilisant les données satellitaires.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

II-1. Zone d'étude

L'estuaire du Saloum (**Figure 1**) se trouve dans la région de Fatick, entre les latitudes 13°40' et 14°22' Nord, et les longitudes 16°57' et 15°56' Ouest. Il est formé de trois principaux cours d'eau : le Saloum, le Diombos et le Bandiala, qui se déversent dans l'océan Atlantique au niveau de la pointe de Sangomar. Il est formé par un réseau de rias et une multitude de chenaux dont les apports en eau douce sont presque absents en raison de la variabilité pluviométrique [8]. L'histoire géologique s'inscrit dans le contexte du bassin sédimentaire sénégal-mauritanien. Les fluctuations climatiques au cours du Quaternaire ont régi les principales phases de la morphogénèse [9]. Les formations géologiques sont constituées de sédiments du Quaternaire et des formations du Continental Terminal dans lesquelles se trouvent la nappe du Maestrichtien, la nappe du Continental Terminal [10] et la nappe du Paléocène. Les ressources pédologiques sont formées de sols ferrugineux tropicaux, de sols hydromorphes et de sols halomorphes [10]. Sur ces faciès lithologiques se développe un couvert végétal constitué de mangroves (*Rhizophora racemosa*

et *Rhizophora mangle* et *Avicennia africana*), des formations herbacées le long des cours d'eau et des steppes arborées. Le climat est chaud et sec et de type tropical soudanien. Il est marqué par l'alternance de deux saisons. Une saison non pluvieuse qui s'étend de novembre à juin [10] et pendant laquelle on note une circulation d'Alizés maritime et une saison pluvieuse de juillet à octobre dominée par la circulation de la mousson issue de l'anticyclone de Sainte-Hélène et pendant laquelle de fortes précipitations sont notées au mois d'août. Cependant, la péjoration pluviométrique, qui a débuté à la fin des années 1960, a beaucoup affecté les volumes de pluies enregistrés dans cette partie du Sénégal [11].

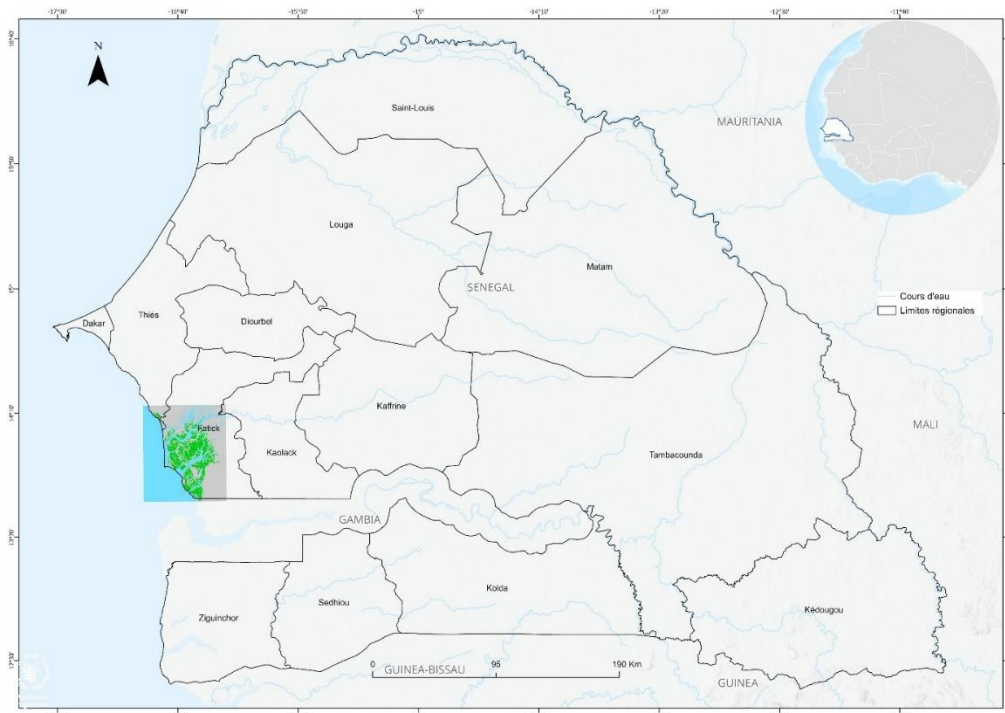


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude

II-2. Les données satellitaires

Les images Landsat ont été choisies pour cette étude en raison de leur accessibilité gratuite, mais aussi pour leur ancienneté, permettant une couverture temporelle étendue de 1972 à 2022. Pour une analyse diachronique permettant de mettre en évidence l'évolution de la mangrove, il est important de choisir des images satellites multidates avec une bonne résolution spatiale et spectrale. Les données utilisées ont été acquises au cours de la saison sèche, principalement entre février et avril. Ce choix saisonnier est dû à la nature de la végétation terrestre.

II-3. Prétraitement des images Landsat

Les mesures de télédétection présentent souvent des erreurs liées aux perturbations atmosphériques, aux mouvements du satellite sur son orbite et parfois des problèmes liés au capteur [10]. Ces sources d'erreurs justifient souvent les séries de correction appliquées dans l'optique d'augmenter la qualité de l'information et minimiser l'incertitude sur les données. Les images Landsat (**Tableau 1**), nécessitent toujours des corrections radiométriques. Il s'agit de convertir les comptes numériques (Digitales Numbers ou DN) en réflectance. Correction du biais de gain, l'effet de diffusion et la correction de l'angle du soleil sont les plus importants pour l'analyse de la végétation à l'aide d'images Landsat [13]. Le calibrage ou étalonnage radiométrique des données permet de convertir le signal enregistré par le satellite en une variable physique telle que la radiance. Les DN correspondent à la numérisation du signal électrique à la sortie du capteur. La conversion des valeurs numériques des images satellitaires en radiance au niveau du capteur repose sur un redimensionnement des facteurs de gain propres à chaque bande spectrale. Cette étape permet d'obtenir des valeurs physiques exprimées en unités de radiance. Afin de rendre ces données comparables entre différentes dates et conditions d'acquisition, les radiances sont ensuite transformées en réflectance. Cette normalisation prend en compte la largeur des bandes spectrales, la distribution spectrale de la lumière solaire, la distance Terre-Soleil et l'angle d'élévation solaire. Elle permet de corriger l'influence des variations saisonnières et géographiques, offrant ainsi des indicateurs fiables pour l'analyse de la couverture végétale et des changements environnementaux.

Tableau 1 : Images satellitaires Landsat utilisées

Satellite	Capteurs	Date d'acquisition	Résolution
Landsat 1-3	MSS	05/11/1972	60
Landsat 4-5	TM	25/02/1986	30
Landsat 4-5	TM	11/02/2010	30
Landsat 8	OLI	25/02/2021	30

II-4. Extraction de la mangrove à l'aide du NDVI

L'indice de végétation est un paramètre largement utilisé de nos jours dans les études relatives surtout aux impacts du changement climatique. Les relations entre les NDVI et les paramètres climatiques ne sont pas encore parfaitement établies et font l'objet de nombreuses études [15]. Cependant, il reste un bon indicateur pour évaluer les impacts du changement climatique sur le couvert végétal. Naturellement, des conditions climatiques favorables entraînent le développement du couvert végétal et la régénération des espaces dégradés. L'extraction de la mangrove a été effectuée à l'aide du NDVI. C'est une transformation très utilisée pour surveiller l'état de la végétation à l'échelle

continentale ou du globe. Une multitude d'autres indices de végétation ont été développés mais le plus connu reste le NDVI. Elle transforme les données multispectrales dans une image à une seule bande représentant la distribution de la végétation. Les NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) indiquent la quantité de végétation verte dans chaque pixel, les valeurs de NDVI les plus élevées indiquent une végétation plus verte [16].

$$\text{NDVI} = \frac{\text{PIR}-\text{R}}{\text{PIR}+\text{R}} \quad (1)$$

L'indice de végétation normalisé (NDVI) est calculé en soustrayant la réflectance du canal rouge de celle du canal proche infrarouge, puis en divisant la différence par la somme des deux. L'image obtenue, indique un gradient d'activité végétale allant du noir pour une absence de végétation, au blanc pour une forte activité chlorophyllienne. Chaque pixel de l'image obtenue présente une valeur comprise entre 0 (sol nu) et 1 (végétation dense). Un seuillage simple a été appliqué sur le NDVI, après détermination d'une valeur seuil basée sur les pixels représentant les minimums et maximums de mangrove. Ce procédé consiste à attribuer la valeur zéro à tous les pixels dont le niveau de gris est inférieur à la valeur seuil, et à fixer une valeur maximale pour ceux dont la valeur est supérieure. Les traitements et analyses ont été réalisés à l'aide des logiciels ArcGIS et ENVI 5.3.

II-5. Acquisition et analyse des données pluviométriques

L'analyse des données pluviométriques des stations de Joal, Foundiougne et Toubacouta s'est faite à l'aide de l'indice de précipitations standardisée (IPS). Le choix de l'indice se justifie par sa simplicité de calcul. Les précipitations représentent le seul paramètre dont il faut disposer. Il est possible de calculer l'indice pour diverses échelles de temps, celui-ci permettant de détecter rapidement les situations de sécheresse et d'en évaluer la gravité. Il est moins complexe que bien d'autres indices et notamment que l'indice de sécheresse de Palmer. L'IPS est obtenu à partir de *l'Équation* suivante [17] :

$$\text{SPI} = \frac{X_i - X_m}{S_i} \quad (2)$$

Dans cette approche, X_i représente le cumul pluviométrique de l'année i , X_m la pluviométrie moyenne de la série, et S_i l'écart type de cette série. L'Indice Pluviométrique Standardisé (IPS) permet de caractériser les conditions hydrologiques. Un IPS supérieur à 1 indique une année humide, tandis qu'un IPS inférieur à 1 correspond à une année sèche. Cet indice nous permet de mettre en évidence l'ensemble des années sèches et humides au cours de la série analysée. Les données utilisées doivent respecter deux critères importants : d'une part, la longueur des chroniques (couvrir la plus longue période possible) et, d'autre part, la qualité des données (moins de données manquantes).

II-6. Acquisition et analyse des données physico-chimiques

La teneur en sel des eaux souterraines et des sols de mangrove joue un rôle important dans l'évolution de cette végétation halophyte. Une concentration élevée en sel dans la solution du sol augmente son potentiel hydrique et perturbe la nutrition des plantes en eau et en nutriments [18]. Les mesures de la salinité des eaux de nappe et de l'acidité des sols ont été réalisées pendant la saison sèche, en avril et mai 2017. La méthode utilisée pour sélectionner les points d'observation s'est appuyée sur la configuration du réseau hydrographique et la localisation de la nappe phréatique. Ainsi, les points d'observation ont été répartis selon un maillage régulier de 25 x 25 km. Les mesures effectuées sur les eaux souterraines ont beaucoup plus porté sur les éventuelles variations au niveau des nappes salées, sont réalisées sur 75 points d'observations (**Figure 2**). La mesure des paramètres physico-chimiques de la nappe phréatique a été réalisée à l'aide d'un ensemble d'équipements spécifiques composé :

- D'un GPS pour la localisation des points de mesure in situ, d'un conductimètre de terrain, pour la mesure de la Conductivité électrique (CE) en $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ce paramètre permet d'apprécier la minéralisation des eaux.
- D'un pH-mètre, qui a permis de mesurer les valeurs de pH des eaux.

II-7. Analyses de laboratoire

Les échantillons de sol (75 points) ont été portés au laboratoire d'analyse de conductivité électrique (CE) et de potentiel hydrogène (pH) [10]. L'interprétation des résultats obtenus est faite sur la base de l'échelle d'interprétation de [19].

Tableau 2 : Échelle d'interprétation du pH et du CE

Échelle du pH	Signification	Échelle de la CE (μS)	Signification
< 4,5	Extrêmement acide	250	Non salin
4,6 - 5,2	Très acide	250-500	Légèrement salin
5,3 - 5,5	Acide	500-1000	Salin
5,6 - 6,0	Modérément acide	1000-2000	Très salin
6,1 - 6,6	Légèrement acide	>2000	Extrêmement salin
6,7 - 7,2	Neutre	-	-
7,3 - 7,9	Légèrement alcalin	-	-
8,0 - 8,5	Alcalin	-	-
>8,5	Très alcalin	-	-

Le traitement des données satellitaires et climatiques a été effectué à l'aide de méthodes appropriées. A l'issus du traitement des données, les résultats ont permis de caractériser l'évolution de la mangrove dans l'estuaire du Saloum.

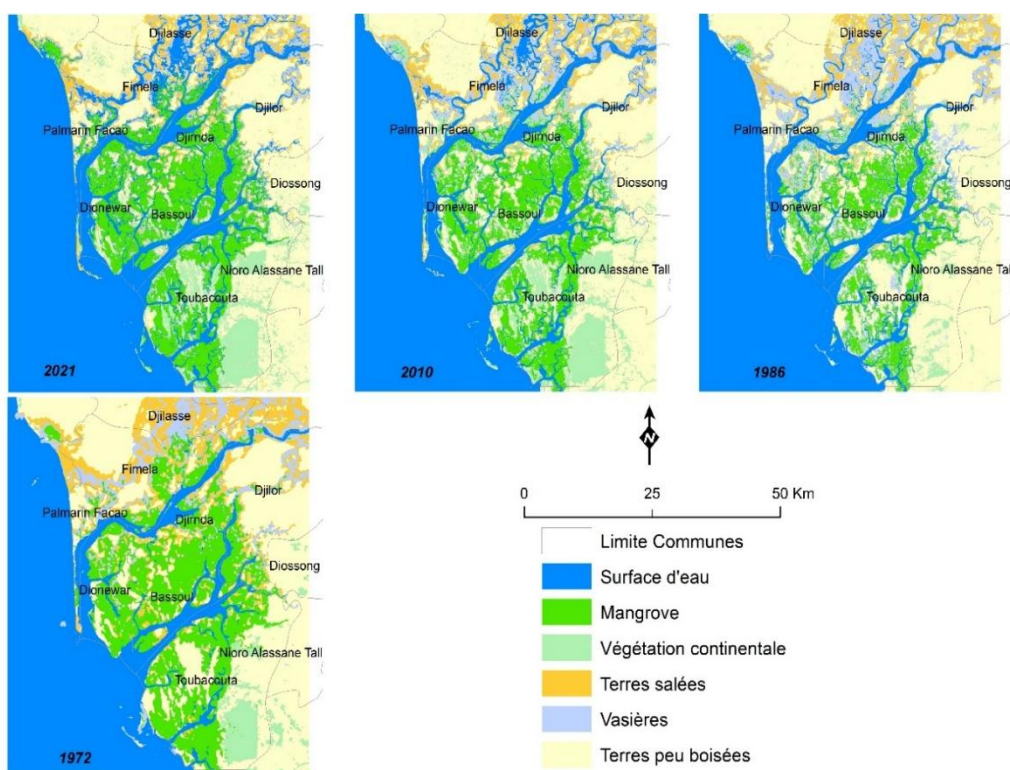
III - RÉSULTATS

III-1. Dynamique de l'occupation du sol de 1972 à 2021

La dynamique de l'occupation du sol dans l'estuaire du Saloum et ses bordures montre une évolution significative de 1972 à 2021. La superficie de la surface d'eau a augmenté constamment, passant de 145 873,62 hectares en 1972 à 170 493,3 hectares en 2021. Cela peut être attribué à plusieurs facteurs, notamment l'élévation du niveau de la mer et les changements climatiques. Les mangroves, essentielles pour la biodiversité et la protection des zones côtières, ont connu des fluctuations notables au fil du temps. En 1972, elles couvraient 17,87% de la superficie totale de l'estuaire, mais cette proportion a fortement chuté pour atteindre 9,32 % en 1986. Une reprise significative est toutefois observée en 2021, avec une couverture estimée à 15,70 %, ce qui pourrait refléter les effets des initiatives de conservation et des programmes de reboisement. La végétation continentale et les terres salées ont montré des variations moins marquées mais significatives. La végétation continentale a diminué progressivement de 3,05 % en 1972 à 6,48 % en 2021, indiquant une perte de végétation naturelle due à la salinisation et à l'exploitation agricole. Les terres salées, quant à elles, ont fluctué mais ont globalement diminué, passant de 9,33 % en 1972 à 5,15 % en 2021. Les vasières, qui jouent un rôle crucial dans l'écosystème estuarien, ont également diminué, particulièrement entre 1986 et 2021, ce qui pourrait être lié à des changements dans les sédiments et les pratiques de gestion des terres. Enfin, les terres peu boisées ont connu une diminution progressive. En 1972, elles représentaient 27,44 % de la superficie totale, mais cette proportion a atteint son maximum en 2010 à 26,95 % avant de diminuer à 24,84 % en 2021. Cette dynamique peut être influencée par les pratiques agricoles, les changements climatiques et les politiques de gestion des terres. Dans l'ensemble, ces changements dans l'occupation du sol reflètent les impacts combinés de l'activité humaine et des facteurs environnementaux dans l'estuaire du Saloum, mettant en évidence la nécessité de stratégies de gestion durable pour préserver ces écosystèmes fragiles.

Tableau 3 : Évolution de la mangrove dans l'estuaire du Saloum entre 1972 et 2021

Unité d'occupation du sol	2021		2010	
	Superficie (ha)	Superficie (%)	Superficie (ha)	Superficie (%)
Surface d'eau	170493,3	40,87 %	162104,49	38,88 %
Mangrove	65495,79	15,70 %	49710,78	11,92 %
Végétation continentale	27016,29	6,48 %	35502,39	8,51 %
Terres salées	21478,5	5,15 %	23098,59	5,54 %
Vasières	29031,57	6,96 %	34178,04	8,20 %
Terres peu boisées	103602,42	24,84 %	112346,91	26,95 %
Unité d'occupation du sol	1986		1972	
	Superficie (ha)	Superficie (%)	Superficie (ha)	Superficie (%)
Surface d'eau	156076,83	37,43 %	145873,62	34,97 %
Mangrove	38856,24	9,32 %	74551,5	17,87 %
Végétation continentale	11663,55	2,80 %	12715,92	3,05 %
Terres salées	20490,75	4,91 %	38897,1	9,33 %
Vasières	54181,53	13,00 %	30639,78	7,35 %
Terres peu boisées	135672,3	32,54 %	114439,95	27,44 %

**Figure 2 : Évolution de l'occupation du sol entre 1972 et 2021 dans l'estuaire du Saloum et ses bordures**

III-2. Évolution du NDVI par rapport à la pluviométrie

L'analyse de l'évolution du NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) par rapport à la pluviométrie entre 1972 et 2021 révèle une corrélation significative entre ces deux variables. De 1972 à la fin des années 1980, la pluviométrie a montré une tendance à la baisse, atteignant un minimum notable en 1983. Cette période de faible précipitation est accompagnée d'une baisse correspondante du NDVI, indiquant une réduction de la densité de la végétation. À partir de la fin des années 1980 et jusqu'en 1999, la pluviométrie a connu une hausse progressive, culminant en 1999. Cette augmentation s'est traduite par une amélioration notable du NDVI, montrant une corrélation positive entre la disponibilité en eau et la densité de la végétation. Ces résultats indiquent que la dynamique végétale dans la région est fortement influencée par les variations annuelles de la pluviométrie, avec une couverture plus dense et une végétation plus vigoureuse durant les années pluvieuses. Depuis les années 2000, bien que la pluviométrie ait présenté des fluctuations, le NDVI affiche une tendance générale à la hausse, particulièrement marquée après 2010. Cette évolution pourrait indiquer que, malgré les variations des précipitations, d'autres facteurs tels que les efforts de reforestation et la mise en œuvre de pratiques de gestion durable des terres ont contribué à l'amélioration de la couverture végétale. Les années 2015 et 2017, caractérisées par des niveaux pluviométriques relativement élevés, montrent des pics correspondants du NDVI, confirmant la réponse positive de la végétation aux augmentations de précipitations. Toutefois, les données postérieures à 2010 montrent également une relative stabilité du NDVI malgré les fluctuations pluviométriques, ce qui indique une résilience de la végétation face aux variations climatiques.

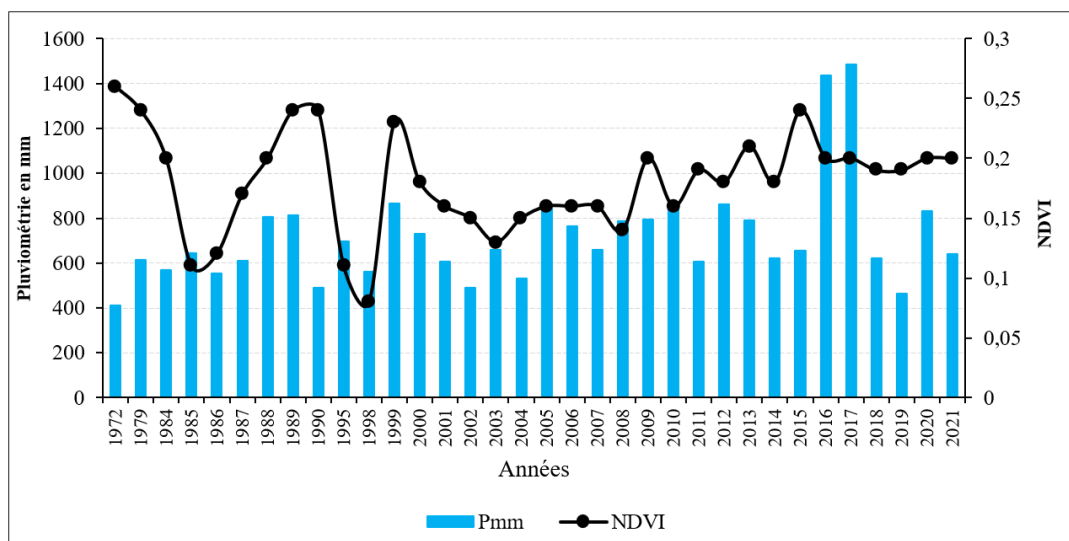


Figure 3 : Évolution du NDVI par rapport aux cumuls pluviométriques annuels dans l'estuaire du Saloum et ses bordures

III-3. Évolution de la densité de la mangrove

Les formations de mangrove Ouest Africaines souffrent des effets du changement climatique depuis le début des sécheresses intermittentes en 1970. Le déficit pluviométrique a induit la baisse des débits des cours d'eau et la remontée du front de salinité vers l'amont des bassins versants. Ce déficit pluviométrique est accompagné par la hausse des températures entraînant une forte tannification notamment au nord de l'estuaire. Il s'en suit une dégradation de la mangrove et une réduction remarquable de sa densité. La **Figure 4** donne un aperçu de l'évolution spatio-temporelle de la densité de la mangrove. L'indice de Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) renseigne sur la densité de la végétation et sa capacité à absorber la lumière solaire et donc son état. Il varie de 0 à 1 pour des surfaces couvertes de végétation comme le cas de la mangrove. Un NDVI proche de 1 correspond à une végétation dense et dans un bon état. Cependant, plus l'indice est proche de 0 moins on a de la végétation ou son état est fortement dégradé [12]. Les indices de la mangrove de 1972 et de 2010 sont globalement en dessous de 0,4 ce qui indique une mangrove éparsée et fortement éprouvée. Ce résultat concorde avec ce qui a été observé dans d'autres études [1] où il a été démontré que la mangrove a été fortement dégradée dans les années 1970 suites aux épisodes de sécheresse qui ont frappées le Sahel. En 1986, l'indice de la mangrove a connu une nette amélioration.

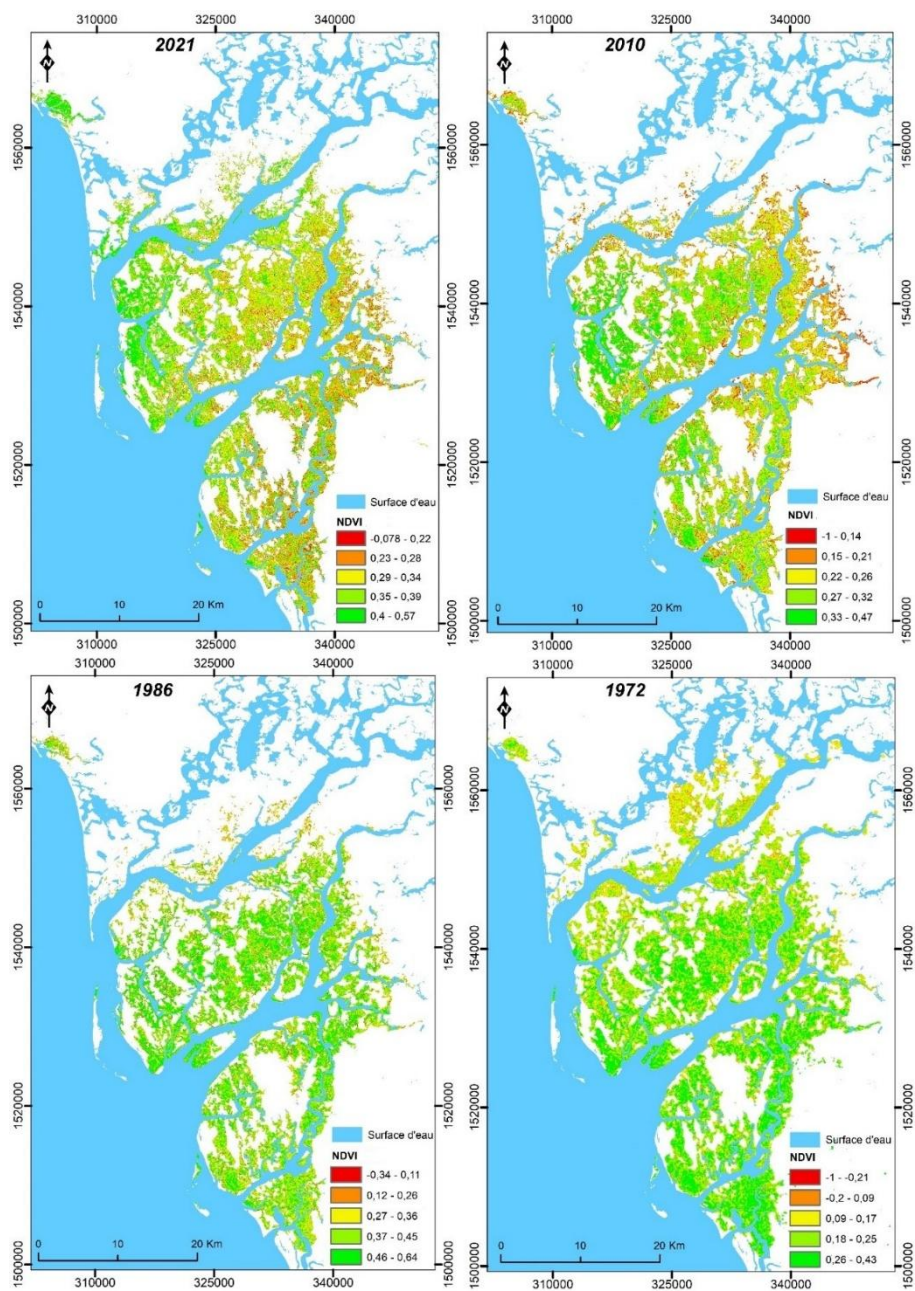


Figure 4 : Évolution de la vitalité de la mangrove entre 1972, 1986, 2010 et 2021 dans l'estuaire du Saloum

III-4. Facteurs de la régénération de la mangrove de l'estuaire du Saloum

III-4-1. Pluviométrie favorable

La péjoration des conditions climatiques, qui a commencé depuis les années 1970 en Afrique de l'Ouest, a eu des incidences sur le couvert végétal. Elle est marquée par une instabilité pluviométrique qui a duré plus de 50 ans. L'analyse de la variabilité pluviométrique dans l'estuaire du Saloum montre que les variations annuelles des précipitations tournent légèrement en faveur de la sécheresse (**Figure 5**). Les résultats de l'indice de précipitation standardisé ont montré que les saisons pluvieuses des années 1950 et 1960 étaient humides. Les années 1970 et 1980, coïncidant avec la grande sécheresse qui avait frappé le Sahel [20], sont marquées par de faibles volumes de pluies. Cette régression des pluies s'est prolongée, en effet, jusqu'à la fin des années 1986, période marquée par une amélioration de la pluviométrie [17, 19]. Les déficits les plus importants sont relevés en 1983 avec un indice de -2 à Foundiougne, en 1996 et 2004 avec un indice respectif de -1,75. La mangrove constitue une espèce dont la croissance et le développement nécessitent une quantité importante d'eau douce apportée par la pluie.

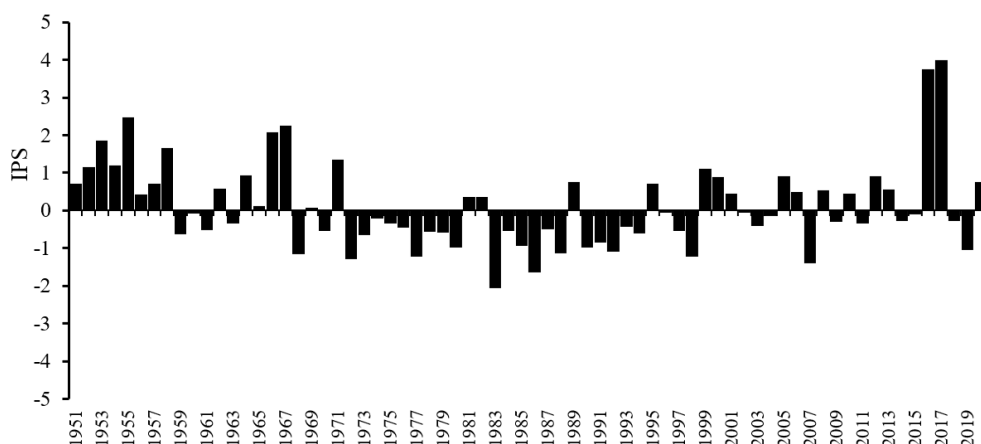


Figure 5 : Indice de pluviométrie standardisé (IPS)

III-4-2. Faible salinité des eaux et des sols

- Salinité des eaux souterraines

L'analyse spatiale du pH et de la conductivité électrique révèle des informations importantes sur la salinité des eaux souterraines dans l'estuaire du Saloum. Le pH montre une prédominance de zones légèrement acides à modérément acides, avec des valeurs de pH allant de 4,6 à 6,0 dans la plupart des régions. Les zones très acides (pH 4,6-5,2) se trouvent principalement dans

le nord et le centre de l'estuaire, indiquant une acidité élevée de l'eau souterraine dans ces zones. Les zones neutres (pH 6,7-7,2) et légèrement alcalines (pH 7,3-7,7) sont moins étendues et situées principalement autour de la périphérie sud-est, ce qui suggère des variations locales des conditions géochimiques. La présence d'eaux très acides dans certaines régions peut être due à des influences de la matière organique en décomposition, des intrusions salines et des processus géologiques locaux. La carte de la conductivité électrique (CE) complète ces observations en fournissant une indication directe de la salinité des eaux souterraines. Les zones non salines (CE 6-250 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et légèrement salines (CE 251-500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) dominent dans les régions périphériques et certaines parties centrales, indiquant une faible présence de sels dissous dans ces eaux. En revanche, les zones salines (CE 501-1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), très salines (CE 1001-2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et extrêmement salines (CE 2001-5100 $\mu\text{S}/\text{cm}$) sont concentrées principalement dans les parties centrales et nord de l'estuaire. Cela reflète une forte influence des eaux salines marines pénétrant dans l'estuaire et impactant la salinité des eaux souterraines locales. Ces variations de salinité peuvent avoir des effets significatifs sur la végétation, les sols et les modes d'utilisation des terres dans cette région. Elles soulignent l'importance d'une gestion rigoureuse des ressources en eau afin de prévenir la dégradation des écosystèmes et la perte de terres agricoles.

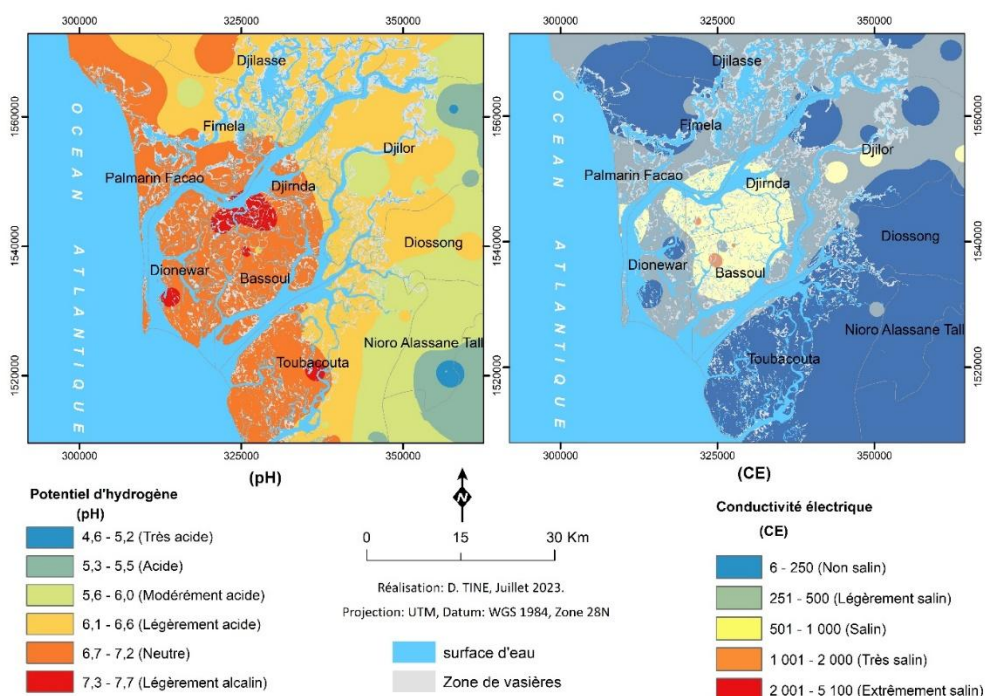


Figure 6 : Répartition spatiale de la conductivité électrique des eaux souterraines dans l'estuaire du Saloum et ses bordures

- ***Salinité des sols***

L'analyse spatiale de la salinité des sols dans l'estuaire du Saloum, à travers le pH et la conductivité électrique (CE), révèle des variations importantes en fonction des typologies des sols et des zones géographiques. Le pH indique une large prédominance de sols acides à légèrement acides. Les zones les plus acides (pH 3,10-4,80) se trouvent principalement dans les zones hydromorphes à gley salé et les sols halomorphes, particulièrement concentrées dans le centre et l'est de la région. Les sols modérément à légèrement acides (pH compris entre 4,81 et 7,40) couvrent une grande partie de la région. Ils incluent notamment des sols peu évolués d'apport ainsi que des sols ferrugineux tropicaux. Cette prédominance d'acidité indique que la majorité des sols présente des conditions susceptibles d'affecter la croissance végétale et de limiter certaines pratiques agricoles. La conductivité électrique montre une forte variation de la salinité des sols. Les zones non salines ($CE > 250 \mu S/cm$) sont principalement situées dans les sols ferrugineux tropicaux et les sols peu évolués d'apport, indiquant une faible accumulation de sels. En revanche, les zones légèrement à modérément salines ($CE 251-1000 \mu S/cm$) sont dispersées dans les zones hydromorphes et halomorphes, particulièrement autour des zones d'eau. Les zones très salines ($CE 1001-2000 \mu S/cm$) et extrêmement salines ($CE > 2000 \mu S/cm$) sont majoritairement concentrées dans le centre de la région et dans certaines zones côtières, suggérant une influence significative des intrusions d'eau salée et des processus d'évaporation qui augmentent la concentration de sels dans les sols. Cette variabilité de la salinité et du pH des sols met en évidence la complexité des conditions pédologiques dans l'estuaire du Saloum. Elle souligne la nécessité de mettre en place des stratégies de gestion différenciées, adaptées à la fois aux exigences agricoles et aux impératifs de conservation environnementale.

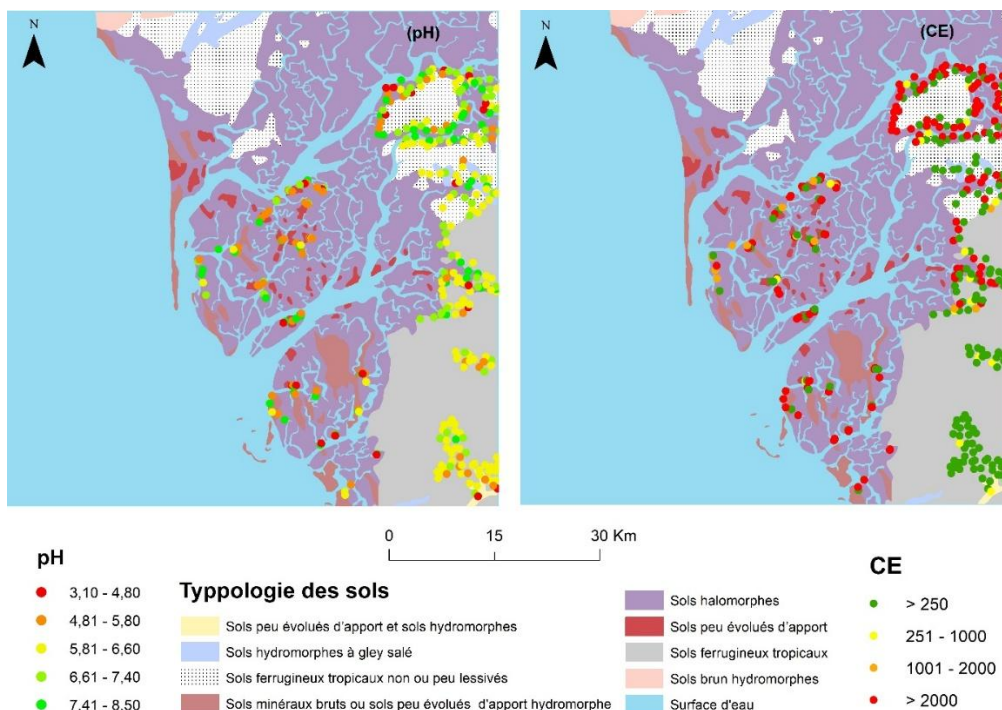


Figure 7 : Répartition spatiale du pH et de la CE des sols dans l'estuaire du Saloum et ses bordures

III-4-3. Projets de conservation et de restauration

Plusieurs projets de conservation et de restauration de la mangrove ont été mis en œuvre dans le Sine Saloum ces dernières années. Ces projets ont eu des impacts positifs sur les formations végétales de mangrove au niveau de l'estuaire du Saloum. En 2005, le projet « initiative équateur » a mobilisé la fédération de groupements féminins d'intérêt économique, basée sur l'île de Niodior afin de restaurer les écosystèmes de la mangrove et encourager à la gestion intelligente des ressources naturelles dans la Réserve de Biosphère du Delta de Saloum, en réponse aux nombreuses pressions subies par les ressources marines et la mangrove de la réserve. A travers ce projet, des campagnes de reboisement ont été effectuées et ont permis de restaurer l'habitat pour plusieurs espèces et contribuer à améliorer la santé des écosystèmes marins et côtiers au sein de la réserve de biosphère. Au total, 8 (huit) zones de mangrove ont été reboisées, ce qui a entraîné une amélioration de la biomasse et la venue en nombre d'une espèce de crustacés.



Figure 8 : *Campagne de reboisement de la mangrove du Delta du Saloum*
(source : UNDP)

En 2012, le WWF/WAMPO en partenariat avec WWF Allemagne ont initié le projet de gestion et de conservation durable de la mangrove au Sénégal [5] qui vise à conserver et à utiliser de manière rationnelle la mangrove du Delta du Saloum et en Casamance. Il s'agit entre autres, de reboiser au moins 1000 ha de mangrove dans les zones du projet [21]. Le projet de restauration et de conservation de l'écosystème de mangrove dans la réserve de biosphère du Delta du Saloum vient compléter les initiatives de reboisement déjà mises en œuvre dans la région. Son objectif principal est de réduire la vulnérabilité de cet écosystème en mettant l'accent sur des stratégies d'adaptation face aux effets du changement climatique. Les reboisements sont souvent effectués par les populations locales, appuyées par les ONGs ou diverses associations, elles-mêmes financées par des bailleurs (tels que la Commission européenne), ou les services étatiques en ayant les compétences (Eaux et Forêts, Aires marines protégées, etc.). L'estuaire du Saloum est un écosystème victime de nombreuses dégradations et faisant l'objet de nombreux projets de restauration ou de réhabilitation de la mangrove. Ces projets seraient à l'origine de la régénération observée à partir des années 2010 (*Tableau 2*).

IV - DISCUSSION

La mangrove est une végétation halophyte tropicale qui colonise les bords de mer. À l'échelle mondiale, de larges bandes côtières tropicales et subtropicales sont bordées de mangroves, dont on estime qu'elles couvraient autrefois une surface d'au moins 32 millions d'hectares alors qu'aujourd'hui, il n'en reste que moins de 15 millions d'hectares, soit moins de la moitié de la surface originelle [22]. Les mangroves représentent 1% des forêts tropicales mondiales et constituent des puits de carbone exceptionnels [23]. Les mangroves ont en effet un potentiel de captation du carbone 3 à 5 fois supérieur à celui des forêts [24]. Cependant, les mangroves sont soumises à la pression anthropique et aux effets du changement climatique. Ces dernières se manifestent par une élévation du niveau marin, l'acidification des océans, le déficit pluviométrique et la réduction des apports d'eau douce. Ce qui représente une sérieuse menace pour les mangroves. Ce danger qui guette les mangroves tropicales est observé depuis les années 1970 et 1980 qui sont marquées par une succession de sécheresses qui ont frappé le Sahel [20]. De faibles volumes de précipitation avaient été enregistrés, ce qui a transformé le Saloum en estuaire inverse par la remontée de la langue salée. Les perturbations du régime hydrologique, associées à la diminution des apports d'eau douce et à leur remplacement par des eaux salées, contribuent fortement à la réduction des superficies occupées par la mangrove.

L'analyse des résultats obtenus à partir de la cartographie diachronique à l'aide des images satellitaires Landsat montre une baisse considérable des superficies de la mangrove dans l'estuaire du Saloum. Entre 1972 et 2021, la mangrove est passée de 74551,5 ha à 65495,79 ha soit une régression de 9055,71 ha. L'état de la mangrove en 1972 montre qu'elle n'avait pas encore subi les effets des sécheresses qui ont commencé dès 1970. La baisse progressive des superficies de la mangrove s'est accompagnée d'un déficit pluviométrique et d'intermittents épisodes de sécheresse en Afrique de l'Ouest. L'indice de Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) qui renseigne sur la densité de la végétation montre que la mangrove éparses dont le NDVI évolue en dessous de 0,4 est observée à la limite de l'estuaire en 1972 et 1986 tandis qu'en 2010 et 2021, la densité diminue à partir du continent vers l'intérieur de l'estuaire. Ce gradient de densité pourrait être attribué à la pression anthropique, à la tannification ainsi qu'à l'acidification des sols de mangrove. L'analyse des eaux souterraines révèle une forte salinité de la nappe, tandis que le pH et la conductivité électrique (CE) présentent des valeurs particulièrement élevées dans les communes de Bassoul, Dionwar, Djirnda et Toubacouta. Leur distribution spatiale met en évidence un gradient de salinité et d'acidité orienté de l'Ouest vers l'Est, c'est-à-dire du littoral vers l'intérieur des terres. La forte salinité observée dans les îles s'explique par la remontée du biseau salé, qui tend à diminuer progressivement à mesure que l'on

s'éloigne de la côte. Les principaux défis actuels pour la conservation de cet écosystème stratégique mais fragile sont les suivants : (i) mettre en place une politique efficace de gestion intégrée et durable des mangroves, en consolidant les acquis dans les Aires Protégées (AMP et AP) ; (ii) promouvoir une gestion participative des zones tampons autour des sites protégés afin de maintenir cette barrière naturelle, indispensable pour limiter la pression anthropique ; (iii) développer des stratégies et des modèles économiques permettant aux populations de tirer parti des services écosystémiques de la mangrove sans compromettre sa préservation [12].

V - CONCLUSION

Ce travail a permis de suivre l'évolution de la mangrove dans l'estuaire de l'estuaire du Saloum et ses bordures dans un contexte de changement climatique. L'étude diachronique a permis d'appréhender les tendances évolutives de cette formation végétale de mangrove. Les images satellitaires Landsat utilisées dans cette étude sont bien adaptées à ce type de problématique. Les superficies de mangrove estimées à partir des images satellitaires révèlent une régression globale de l'ordre de 9 055,71 hectares entre 1972 et 2021. Cette diminution s'explique par plusieurs facteurs, notamment le changement climatique, marqué par une forte variabilité pluviométrique mise en évidence par l'Indice de Précipitation Standardisé (IPS), la baisse des débits fluviaux, la remontée de la langue salée et l'acidification des sols de mangrove. À ces éléments s'ajoute une salinité élevée des eaux souterraines, avec une conductivité électrique supérieure à 2 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans la partie ouest et nord de l'estuaire. Ces contraintes ont influencé la densité de la mangrove, qui a connu des phases d'altération (1972, 2010 et 2021) alternant avec des périodes de régénération (1986). Le changement climatique constitue une menace à laquelle sont soumises les formations végétales de mangrove.

RÉFÉRENCES

- [1] - E. H. B. DIEYE, T. D. Diaw, T. SANÉ and N. NDOUR. *Dynamique de la mangrove de l'estuaire du Saloum (Sénégal) entre 1972 et 2010. Cybergeog : European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*, (2013) 1 - 27
- [2] - J. G. KAIRO et J. BOSIRE, *Ecologie et restauration des forêts de mangroves au Kenya. Nature et faune, l'importance des forêts de mangrove pour la pêche, la faune sauvage et les ressources en eau en Afrique*, Vol. 24, N°1 (2009) 44 - 51 p.
- [3] - C. GORDON, E. TWENEBOAH, A. MENSAH, J. AYIVOR, *L'application de l'approche écosystémique à la gestion des mangroves, leçons pour le Ghana. Nature et faune, l'importance des forêts de mangrove pour la pêche, la faune sauvage et les ressources en eau en Afrique*, Vol. 24, N°1 (2009) 31 - 43 p.
- [4] - UICN, Initiative Mangrove en Afrique de l'Ouest (IMAO) : rapport annuel. *Union internationale pour la conservation de la nature*, (2010) 113 p.
- [5] - M. D. BA, E. M. DIALLO, C.G. NKAYA MAMBOU, N. W. NKODIA MISSENGUI, *Projet de gestion et de conservation durable des écosystèmes du delta du Saloum*, (2021)
- [6] - D. TINE, M. FAYE, G. FAYE & G. FAYE, *Analyse par imagerie satellitaire de la dynamique de l'occupation du sol dans les rivières du Sud : De la basse Casamance (Sénégal) au Rio Gêba (Guinée-Bissau)*, *Revue Espaces Africains (En ligne)*, 2 | 2022 (Varia), Vol. 1, ISSN : 2957- 9279, mis en ligne, le 30 décembre 2022
- [7] - M. C. CORMIER SALEM (8-15 mai 1994). *Dynamique et usages de la mangrove dans les pays des Rivières du Sud (du Sénégal à la Sierra Leone) : acte de l'atelier de travail de Dakar*. <https://books.openedition.org/irdeditions/3918>
- [8] - D. TINE, M. FAYE, E. M. DIOUF, A. FALL & B. FAYE, *Détection de changement d'occupation du sol et analyse de la dynamique des terres salées dans le Département de Foundiougne (Sénégal)*. *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*, 10 (4) (2020) 18 - 31 p.
- [9] - P. PEREZ, *Genèse du ruissellement sur les sols cultivés du Sud du Saloum (Sénégal) : du diagnostic à l'aménagement de la parcelle*. Thèse de Doctorat, Ecole supérieure agronomique de Montpellier, (1994) 240 p.
- [10] - D. TINE, M. FAYE, A. A. SY & G. FAYE, *Salinisation-acidification et risque d'érosion hydrique des sols dans le département de Foundiougne, Sénégal : approche par télédétection et système d'information géographique-SIG*, *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 41 (2023) 183 - 203
- [11] - M. FAYE, D. TINE, F. DIOUF, A. CISSAY & C. S. FAYE, *Climate Change and Land Use Dynamics in Djirnda Commune (Fatick Region-Senegal): Remote Sensing Approach*. *European Journal of Biology and Biotechnology*, 3 (4) (2022) 1 - 7

- [12] - G. FAYE, D. TINE, C. DIEDHIOU, C. SENE, A. SEYDI et M. M. M. NDOUR, *Cloud Computing and Machine Learning for Analyzing Spatiotemporal Dynamics of Mangrove Ecosystems in the Grand Saloum (Senegal and Gambia)*. American Journal of Environmental Protection, Vol. 9, N° 1 (2021) 29 - 42
- [13] - K. GUPTA, A. MUKHOPADHYAY, S. Giri, A. A. CHANDA, S. D. MAJUMDAR, S. SAMANTA, D. MITRA, R. N. SAMAL, A. K. PATTNAIK et S. HAZRA, *An index for discrimination of mangroves from non-mangroves using LANDSAT 8 OLI imagery*. MethodsX, 5 (2018) 1129 - 1139 p.
- [14] - G. CHANDER, L. M. BRIAN et D. L. HELDER, Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Journal Remote Sensing of Environment*, 113 (2009) 893 - 903 p.
- [15] - P. DIELLO, G. MAHE, J. M. PATUREL, A. DEZETTER, F. DELCLAUX, E. SERVAT and F. OUATTARA, *Relations indices de végétation et pluie au Burkina Faso : cas du bassin versant du Nakambé*. *Hydrological Sciences Journal*, 50 (2) (2005) 15 p.
- [16] - C. J. TUCKER, Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sens. Environ.*, 8 (1979) 127 - 150
- [17] - T. B. MCKEE, N. J. DOESKEN & J. KLEIST, The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. *American Meteorological Society*. Anaheim, California, (1993) 179 - 184 p.
- [18] - AUTEURS, Comment les plantes supportent-elles un régime salé ? Encyclopédie de l'environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] (2020). URL : <http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=11786>
- [19] - J. H. DURAND, Les Sols irrigables : étude pédologique. Paris : agence de coopération culturelle et technique, presses universitaires de France, (1983) X-339 p.
- [20] - M. FAYE, A. FALL, D. TINE, C. S. FAYE, B. FAYE et A. NDIAYE, *Evolution pluviométrique de 1950 à 2013 au Sénégal oriental : cas de la Région de Tambacounda*. *Int. J. Adv. Res*, 7 (12) (2019) 270 - 287
- [21] - A. A. DIEDHIOU, *Projet de gestion et de conservation durable de la mangrove au Sénégal*, (2012) 8 p.
- [22] - FAO, *The world's mangroves 2000–2020*. Rome, (2023). <https://doi.org/10.4060/cc7044en>
- [23] - F. L. NGOMBA, *Les mangroves : écosystèmes de régulation et de protection contre le réchauffement climatique*. *Revue Intelligence Stratégique*, 4 (8) (2021) 18 - 29. <https://doi.org/10.62912/>
- [24] - L. N. FELLY, *Les mangroves : écosystèmes de régulation et de protection contre le réchauffement climatique*, Journal des publications scientifiques, Vol. 4, N°8 (2021) p-ISSN : 3006-547X ; e-ISSN : 3006-5488