

Vulnérabilité socio-écologique et systèmes de production dans les Niayes du Sénégal : analyse géospatiale multicritère et perspectives de durabilité

***Ibra Faye
El Hadji Balla Dièye
Henri Marcel Seck
Djiby Yade
Fatou Faye***

Laboratoire de Géomatique et d'Environnement (LGE),
Université Assane Seck de Ziguinchor, Sénégal

[Doi:10.19044/esj.2026.v22n20p171](https://doi.org/10.19044/esj.2026.v22n20p171)

Submitted: 01 May 2026

Accepted: 17 June 2026

Published: 31 July 2026

Copyright 2026 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

Cite As:

Faye, I., Dièye, E.H.B., Seck, H.M., Yade, D., & Faye, F. (2026). *Vulnérabilité socio-écologique et systèmes de production dans les Niayes du Sénégal : analyse géospatiale multicritère et perspectives de durabilité*. European Scientific Journal, ESJ, 22 (20), 171.
<https://doi.org/10.19044/esj.2026.v22n20p171>

Résumé

Les Niayes du Sénégal constituent un territoire agroécologique stratégique dont la durabilité est aujourd'hui compromise par la convergence de pressions démographiques, climatiques et anthropiques croissantes. Situés le long de la frange littorale nord-ouest du pays, entre Dakar et Saint-Louis, ces socio-écosystèmes côtiers se distinguent par une mosaïque de dépressions humides inter-dunaires, de cordons sableux et de zones humides, offrant des conditions biophysiques exceptionnellement favorables à la production maraîchère intensive. Cet article propose une analyse intégrée de la vulnérabilité socio-écologique de la zone des Niayes, en mobilisant conjointement des données géospatiales (Sentinel-2, MNT, WorldPop) et des données d'enquêtes de terrain conduites auprès de 390 producteurs en décembre 2025. Un Indice Composite de Vulnérabilité Socio-Écologique (ICVSE) a été construit par analyse multicritère AHP, intégrant trois composantes pondérées : l'exposition physique (25 %), la sensibilité écologique (35 %) et la capacité d'adaptation (40 %). Les résultats cartographiques révèlent une domination des classes de vulnérabilité élevée à

très élevée sur l'ensemble du territoire, avec une absence quasi-totale de zones résilientes. Les enquêtes de terrain révèlent une forte dépendance des ménages aux activités primaires (agriculture : 35,36 % ; pêche : 30,74 % ; commerce : 20,91 %), une faible diversification économique (63 % des enquêtés sans activité secondaire) et des tensions foncières accentuées par l'urbanisation et l'exploitation minière. Ces résultats plaident pour des politiques intégrées de gestion territoriale combinant préservation des ressources naturelles, diversification économique et planification participative.

Mots-clés : Niayes, Vulnérabilité socio-écologique, Systèmes de production, Sénégal

Socio-Ecological Vulnerability and Production Systems in the Niayes Region of Senegal: A Multi-Criteria Geospatial Analysis and Prospects for Sustainability

Ibra Faye
El Hadji Balla Dièye
Henri Marcel Seck
Djiby Yade
Fatou Faye

Laboratory of Geomatics and the Environment (LGE),
Assane Seck University of Ziguinchor, Senegal

Abstract

The Niayes region of Senegal constitutes a strategic agro-ecological area whose sustainability is now under threat due to the convergence of growing demographic, climatic and human pressures. Located along the country's north-western coastline, between Dakar and Saint-Louis, these coastal socio-ecosystems are characterised by a mosaic of inter-dune wet depressions, sand spits and wetlands, offering exceptionally favourable biophysical conditions for intensive vegetable production. This article presents an integrated analysis of the socio-ecological vulnerability of the Niayes region, drawing on a combination of geospatial data (Sentinel-2, SRTM DTM, WorldPop) and data from field surveys conducted among 390 producers in December 2025. A Composite Socio-Ecological Vulnerability Index (CSEVI) was constructed using AHP multi-criteria analysis, incorporating three weighted components: physical exposure (25%), ecological sensitivity (35%) and adaptive capacity (40%). The mapping results reveal a predominance of high to very high vulnerability classes across the

entire territory, with an almost total absence of resilient areas. The field surveys reveal a strong dependence of households on primary activities (agriculture: 35.36%; fishing: 30.74%; trade: 20.91%), low economic diversification (63% of respondents without a secondary activity) and land-use tensions exacerbated by urbanisation and mining. These findings call for integrated territorial management policies combining natural resource conservation, economic diversification and participatory planning.

Keywords: Niayes, socio-ecological vulnerability, production systems, Senegal

Introduction

Les zones côtières sahéliennes d'Afrique de l'Ouest regorgent des enjeux environnementaux, démographiques et socio-économiques sans précédent. Parmi elles, les Niayes du Sénégal constituent un cas emblématique de socio-écosystème littoral sous pressions multiples (Dryade, 1990 ; Dia, 2000). Elles abritent plus de 2,5 millions d'habitants et assurent près de 80 % de la production maraîchère nationale, faisant d'elles un territoire à la fois stratégique et hautement vulnérable (CSE, 2020 ; ANSD, 2023).

Ce territoire se caractérise par une configuration géomorphologique originale, associant dunes sableuses, dépressions humides inter-dunaires et zones de transition écologique, qui lui confère des potentialités agroécologiques remarquables. La présence de nappes phréatiques peu profondes, d'un microclimat favorisé par la proximité de l'océan Atlantique et de sols hydromorphes fertiles soutient une agriculture irriguée intensive à haute valeur ajoutée, largement portée par le maraîchage (Fall et al., 2001 ; FAO, 2017 ; ISRA, 2020). La région concentre ainsi plus de 70 % de la production horticole nationale avec des cultures majeures telles que la carotte, l'oignon, la tomate et le chou (ANSD, 2023).

Toutefois, la durabilité des Niayes est aujourd'hui compromise par la convergence de trois catégories de pressions interdépendantes. Les pressions démographiques se manifestent par une multiplication de la population par cinq entre 1976 et 2023, avec des densités locales dépassant 500 habitants au kilomètre carré dans les communes les plus urbanisées (ANSD, 2023). Les pressions environnementales se traduisent par une variabilité pluviométrique accentuée depuis les années 1970, une salinisation progressive des nappes phréatiques, une érosion dunaire et littorale et les effets du changement climatique global (Sagna et al., 2014 ; GIEC, 2022). Enfin, les pressions anthropiques se manifestent à travers une expansion urbaine non planifiée, le développement de l'exploitation minière industrielle par les Industries Chimiques du Sénégal (ICS) et la Grande Côte Opérations (GCO/ERAMET), et l'intensification des pratiques agricoles (Diallo, 2017 ; Seck et al., 2024).

Ces dynamiques convergentes compromettent la résilience des systèmes de production locaux et accentuent la vulnérabilité socio-écologique des ménages, particulièrement ceux dont les moyens d'existence dépendent directement des ressources naturelles. Si plusieurs études ont analysé les dynamiques paysagères ou les systèmes de production des Niayes séparément (Tappan et al., 2004 ; Ndao, 2012 ; CSE, 2020 ; Ndour et al., 2020), peu ont proposé une approche intégrée combinant cartographie géospatiale multicritère et enquêtes socio-économiques à large échelle pour produire un indice synthétique de vulnérabilité territorialisé.

Cet article comble cette lacune en proposant un cadre analytique intégré articulant quatre objectifs complémentaires : (i) caractériser la configuration biophysique et la distribution spatiale des ressources dans les Niayes ; (ii) analyser la diversité et les dynamiques des systèmes de production à partir d'enquêtes de terrain ; (iii) cartographier les gradients de vulnérabilité socio-écologique par la construction d'un Indice Composite de Vulnérabilité Socio-Écologique (ICVSE) par méthode AHP et analyse SIG multicritère ; et (iv) proposer des leviers d'action pour une gestion territoriale durable et résiliente.

La zone d'étude

Localisation et délimitation géographique

La zone des Niayes, communément désignée sous le nom de Grande Côte, s'étend le long du littoral nord-ouest du Sénégal, de Dakar à Saint-Louis (figure 1). Géographiquement, elle se situe entre 14°3' et 16°N de latitude et entre 16° et 17°5'W de longitude, couvrant une longueur de plus de 180 km et une largeur variant de 30 à 35 km, pour une superficie totale d'environ 2 300 km² (Dryade, 1990). Encadrée par les agglomérations urbaines de Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis, la zone des Niayes accueille une population en croissance continue et constitue la principale zone de production maraîchère du pays (CSE, 2020 ; Ndour et al., 2020).

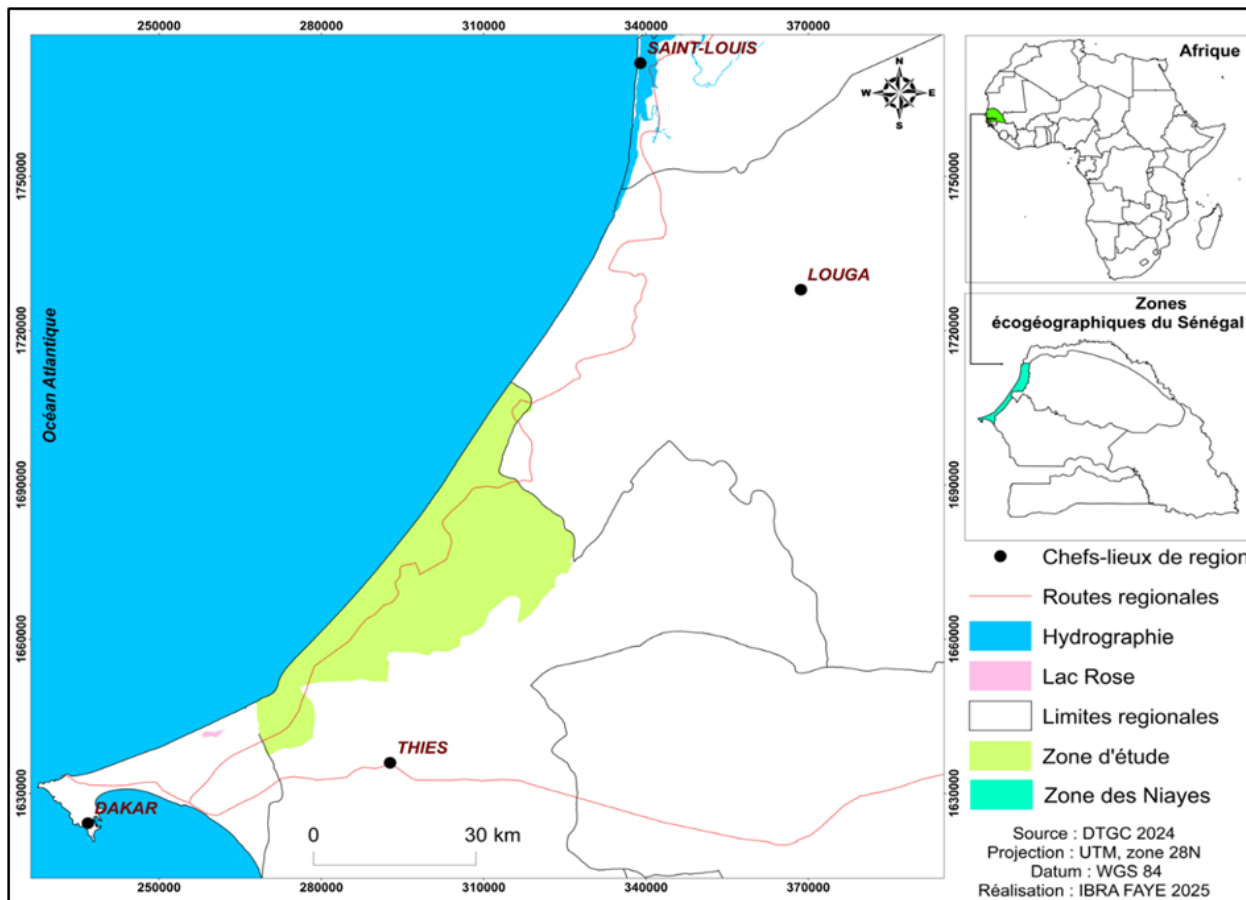


Figure 1 : Localisation de la zone des Niayes du Sénégal

Caractéristiques biophysiques

Les Niayes présentent un régime climatique de type sahélien, caractérisé par une forte saisonnalité opposant une courte saison des pluies de juillet à octobre à une longue saison sèche. La pluviométrie annuelle moyenne présente une forte variabilité interannuelle accentuée depuis les années 1970 (Sagna et al., 2014 ; Dème, 2021). La proximité de l'océan Atlantique génère un microclimat favorable avec une humidité relative de 60 à 80 % en saison des pluies (FAO, 2017). Sur le plan morphologique, la région repose sur un substrat sablo-dunaire ponctué de dépressions humides inter-dunaires, avec une altitude maximale de 96 m et 51,73 % de la zone côtière présentant des altitudes inférieures à 7 m, condition topographique qui amplifie la vulnérabilité littorale aux intrusions marines. La physionomie du territoire est marquée par une alternance de trois systèmes de dunes : les dunes blanches littorales (photographie 1), les dunes jaunes semi-fixées et les dunes rouges continentales formées principalement de sols diors (Michel, 1973 ; Fall et al., 2001 ; Sagna, 2005).

Photographie 1 : Dunes blanches observées dans la zone des Niayes du Sénégal



Source : Cliché Faye, Décembre, 2025

Contexte socio-économique

Avec plus de 2,5 millions d'habitants en 2023 (ANSD, 2023), la zone des Niayes constitue l'un des espaces les plus densément peuplés du Sénégal. Les principales activités économiques sont le maraîchage (70 % de la population active), la pêche artisanale, le commerce et l'élevage (Kessler et Tine, 2004 ; FAO, 2017 ; ANSD, 2023). Deux projets miniers industriels majeurs y sont actifs : les ICS exploitant le phosphate depuis 1960 dans les communes de Darou Khoudoss, Taïba Ndiaye et Méouane, et la GCO/ERAMET exploitant les sables titanifères (zircon, ilménite) depuis 2014 à Diogo et Lompoul, dont les impacts paysagers sont significatifs et mesurables par télédétection (Diallo, 2017 ; Seck et al., 2024).

Données et méthodes

Données géospatiales

La démarche géospatiale repose sur l'exploitation de trois sources de données complémentaires (tableau 1). Les images Sentinel-2 MSI (résolution 10 m, saison sèche novembre 2025 – avril 2026, taux de nuages < 10 %) ont constitué la source principale pour le calcul des indices spectraux. Le prétraitement a inclus la correction géométrique, atmosphérique de surface (niveau SR Harmonisé), le masquage des nuages par l'algorithme QA60 et la production d'une mosaïque médiane annuelle sans nuages via Google Earth Engine (GEE). Les données topographiques issues du MNT SRTM (résolution 30 m) ont permis la cartographie des altitudes et des pentes, deux variables déterminantes dans l'évaluation de l'exposition physique au sein de l'ICVSE. Les données de densité de population WorldPop 2020 (résolution 100 m) ont fourni la composante démographique de la sensibilité socio-écologique.

Tableau 1 : Données géospatiales utilisées dans l'étude

Source	Capteur	Résolution	Période	Utilisation dans l'ICVSE
Sentinel-2 SR	MSI	10 m	Mars 2026	NDVI, BSI, indice salinité, NDWI, SMI → C2 sensibilité
MNT	SRTM	30 m	2026	Altitude, pente → C1 exposition et C3 adaptation
WorldPop	Multi	100 m	2026	Densité population → C2 sensibilité

Source : Données satellitaires (2026)

Données socio-économiques

Les données socio-économiques reposent sur des enquêtes de terrain menées du 1er au 31 décembre 2025 auprès de 390 producteurs dans la zone des Niayes, complétées par 42 entretiens semi-directifs conduits auprès d'acteurs clés (chefs de village, agents techniques de l'agriculture, responsables de coopératives agricoles et de groupements d'intérêt économique). Le protocole d'échantillonnage a mobilisé deux techniques adaptées à la nature des données collectées.

Pour les 390 producteurs, un échantillonnage par commodité stratifié a été retenu. La zone d'étude a d'abord été divisée en trois strates géographiques : le secteur sud (Kayar, Djiender Guedj, $n = 130$), le secteur centre (Mboro, Darou Khoudoss, Taïba Ndiaye, $n = 155$) et le secteur nord (Fass Boye, Diogo, $n = 105$). Au sein de chaque strate, les producteurs ont été sélectionnés selon leur disponibilité et leur accessibilité lors du passage de ménage en ménage. La taille totale de l'échantillon a été déterminée par la formule de Cochran (1977) pour une proportion estimée $p = 0,5$, un seuil de confiance de 95 % et une marge d'erreur de 5 %, appliquée à la population totale des exploitants agricoles recensés par les Services Régionaux du Développement Rural (SRDR) en 2024. La répartition entre secteurs est proportionnelle à la densité de producteurs enregistrés dans chaque strate. Il convient de reconnaître que cette approche, bien que couramment utilisée dans les contextes d'enquêtes rurales à ressources limitées, ne garantit pas une représentativité probabiliste stricte.

Pour les 42 entretiens semi-directifs, un échantillonnage raisonné (purposive sampling) a été appliqué, les répondants ayant été sélectionnés en raison de leur position stratégique et de leur connaissance approfondie du secteur agricole de la zone des Niayes.

Structure du questionnaire et protocole d'entretien

Le questionnaire individuel administré aux 390 producteurs comprenait cinq sections : (i) caractéristiques socio-démographiques du ménage (sexe, âge, niveau d'instruction, taille du ménage, ancienneté dans la

commune); (ii) système de production et foncier (superficie exploitée, cultures pratiquées, mode de faire-valoir, accès à l'irrigation); (iii) diversification économique et revenus (activités principale et secondaire, estimation mensuelle des revenus, accès au crédit); (iv) perception et expérience des risques environnementaux (vulnérabilité perçue, changements observés sur les ressources naturelles, stratégies d'adaptation déjà mises en œuvre); (v) accès aux services et aux infrastructures (distance au marché, accès à la route bitumée, accès aux soins de santé).

Les entretiens ont été conduits en face-à-face en français et en wolof selon la maîtrise linguistique de l'enquêté, par une équipe de huit enquêteurs formés lors d'une session de deux jours préalables au déploiement sur le terrain. La durée moyenne d'administration était de 45 minutes par enquêté. Les données ont été saisies dans le logiciel KoboToolbox et exportées en format CSV pour traitement sous R.

Éthique de la recherche et consentement éclairé

Cette étude a été conduite conformément aux principes éthiques de la recherche en sciences sociales. Avant chaque entretien, le consentement éclairé verbal de chaque participant a été obtenu. Les enquêtés ont été informés des objectifs scientifiques de l'étude, du caractère volontaire et anonyme de leur participation, et de la confidentialité stricte des informations recueillies. Aucune information nominative n'a été conservée dans la base de données finale ; chaque enquêté est identifié uniquement par un code anonyme.

Les entretiens semi-directifs conduits auprès des acteurs clés (chefs de village, agents techniques, responsables de coopératives) ont également fait l'objet d'un accord explicite de participation, avec autorisation de prise de notes. Cette étude n'a pas nécessité d'autorisation formelle d'un comité d'éthique institutionnel, car elle ne collecte pas de données biomédicales sensibles, conformément aux dispositions de la loi sénégalaise n° 2008-12 sur la protection des données à caractère personnel.

Traitement des données d'enquêtes

Le traitement statistique des données d'enquêtes a mobilisé des méthodes descriptives (fréquences relatives, moyennes, écarts-types) et multivariées. Une classification ascendante hiérarchique (CAH) par la méthode de Ward a été appliquée pour identifier des profils typologiques de ménages selon leurs systèmes de production, leur niveau de diversification économique et leur vulnérabilité perçue. La CAH a porté sur 12 variables actives standardisées (surface cultivée, revenu mensuel estimé, nombre de cultures pratiquées, proportion du revenu tiré de la pêche, de l'agriculture, du commerce, indice de diversification, accès au crédit, ancienneté dans la commune, score de vulnérabilité perçue, distance aux marchés, distance aux

ressources en eau), et a produit quatre classes homogènes validées par le dendrogramme et l'indice de Davies-Bouldin. Une analyse de régression logistique binaire a permis d'identifier les déterminants socio-économiques et spatiaux de la pratique d'une activité secondaire (variable dépendante : 1 = possède une activité secondaire, 0 = n'en possède pas). Les variables explicatives retenues après test de colinéarité ($VIF < 5$) sont : l'âge du chef de ménage, le niveau d'instruction, la surface cultivée, le secteur géographique, la distance aux axes routiers principaux et l'appartenance à un groupement agricole. Les résultats de cette régression sont présentés dans le tableau 5 (cf. section Résultats). Tous les traitements statistiques ont été réalisés sous le logiciel R (version 4.3.2) avec les packages FactoMineR, cluster et stats.

Construction de l'Indice Composite de Vulnérabilité Socio-Écologique (ICVSE)

La construction d'un Indice Composite de Vulnérabilité Socio-Écologique (ICVSE) par analyse multicritère AHP (*Analytical Hierarchy Process*) constitue une approche robuste et largement documentée dans la littérature sur la vulnérabilité côtière (Füssel et Klein, 2006 ; Magnan, 2009). Elle permet d'agréger des variables de natures différentes en un indice synthétique spatialisé, productible et cartographiable sous un Système d'Information Géographique. L'ICVSE intègre trois composantes principales issues du cadre conceptuel de Turner et al. (2007) : exposition, sensibilité et capacité d'adaptation, pondérées selon la matrice de comparaison par paires AHP présentée dans le tableau 2 ci-dessous. L'ensemble des traitements a été réalisé sous Google Earth Engine (GEE) pour le calcul des indices spectraux, et sous ArcGIS 10.8 pour la cartographie finale. Le script GEE utilisé est disponible en annexe numérique de cet article (cf. Annexe).

Calcul des indices spectraux

Cinq indices spectraux ont été calculés à partir des images Sentinel-2 pour alimenter les composantes de l'ICVSE. Il s'agit :

- Le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) mesure l'état de la végétation et sa dégradation (Tucker, 1979) :

$$NDVI = \frac{\text{Bande Proche Infrarouge} - \text{Bande Rouge}}{\text{Bande Proche Infrarouge} + \text{Bande Rouge}}$$

- Le NDWI (*Normalized Difference Water Index*) renseigne sur la disponibilité en eau de surface (McFeeters, 1996) :

$$NDWI = \frac{\text{Bande Verte} - \text{Bande Proche Infrarouge}}{\text{Bande Verte} + \text{Bande Proche Infrarouge}}$$

- Le BSI (*Bare Soil Index*) quantifie la proportion de sols nus et dégradés (Xu, 2006) :

$BSI = [(Bande\ Moyen\ Infrarouge\ 1 + Bande\ Rouge) - (Bande\ Proche\ Infrarouge + Bande\ Bleue)] / [(Bande\ Moyen\ Infrarouge\ 1 + Bande\ Rouge) + (Bande\ Proche\ Infrarouge + Bande\ Bleue)]$.

- L'indice de salinité (SI) évalue les concentrations salines superficielles

SI = $\sqrt{(Bande\ Rouge \times Bande\ Verte)}$.

- L'indice d'humidité du sol (SMI) complète l'analyse de l'état hydrique

SMI = $(Bande\ Proche\ Infrarouge - Bande\ Moyen\ Infrarouge\ 2) / (Bande\ Proche\ Infrarouge + Bande\ Moyen\ Infrarouge\ 2)$.

Composition et pondération des trois composantes

La composante C1 (Exposition physique, poids : 25 %) intègre l'altitude issue du MNT, la pente et la distance à l'océan Atlantique calculée par transformation de distance sur le masque JRC. Des altitudes basses et une faible distance à la mer traduisent une exposition physique élevée, notamment face au risque d'intrusion saline et de submersion. Cette composante rend compte du gradient littoral-continent structurant observé dans les résultats cartographiques.

La composante C2 (Sensibilité écologique et démographique, poids : 35 %) agrège cinq sous-variables : le NDVI, le BSI, l'indice de salinité, la densité de population (WorldPop) et le NDWI. C'est la composante qui exprime le plus directement les transformations écologiques en cours dans les Niayes, notamment la dégradation du couvert végétal dans les périmètres miniers et la salinisation des zones basses.

La composante C3 (Capacité d'adaptation, poids : 40 %) intègre la distance aux routes, l'humidité du sol et l'altitude (zones plus élevées = moins d'exposition et meilleures conditions d'adaptation). Cette composante reçoit le poids le plus élevé conformément au cadre théorique d'Adger (2006), qui souligne que la capacité d'adaptation est le facteur le plus déterminant dans la réduction de la vulnérabilité à long terme (tableau 2).

Tableau 2 : Structure de l'ICVSE : composantes, variables et poids AHP

Composante (poids)	Poids	Variables intégrées	Source de données
C1 (Exposition physique)	25 %	Altitude + pente + distance à la mer	SRTM
C2 (Sensibilité écologique)	35 %	NDVI + BSI + salinité + population + NDWI	Sentinel-2 et WorldPop
C3 (Capacité d'adaptation)	40 %	Distance routes + humidité sol + altitude	Sentinel-2, SRTM

Source : Traitements cartographiques (2026)

L'ICVSE est calculé par agrégation linéaire pondérée : $ICVSE = 0,25 \times C1 + 0,35 \times C2 + 0,40 \times C3$. Les valeurs de l'ICVSE sont comprises entre 0 (très faible vulnérabilité) et 1 (vulnérabilité très élevée). La discrétisation finale en quatre classes de vulnérabilité (très faible, faible à modérée, élevée, très élevée) a été réalisée par la méthode des seuils naturels (*Jenks*) appliquée à la distribution statistique des valeurs de l'ICVSE, afin de maximiser la variance interclasse et de minimiser la variance intra classe, conformément aux bonnes pratiques de cartographie thématique.

Résultats

Configuration biophysique et distribution spatiale des ressources

Organisation morphologique et pédologique

L'analyse de la carte issue du modèle numérique de terrain (MNT) révèle un gradient altitudinal orienté Est-Ouest, avec une altitude maximale de 96 m à l'intérieur des terres et 51,73 % de la superficie de la zone côtière présentant des altitudes inférieures à 7 m (figure 2). Cette configuration topographique basse constitue un facteur structurant de la vulnérabilité physique, en accentuant l'exposition aux intrusions marines et à la salinisation des nappes phréatiques superficielles.

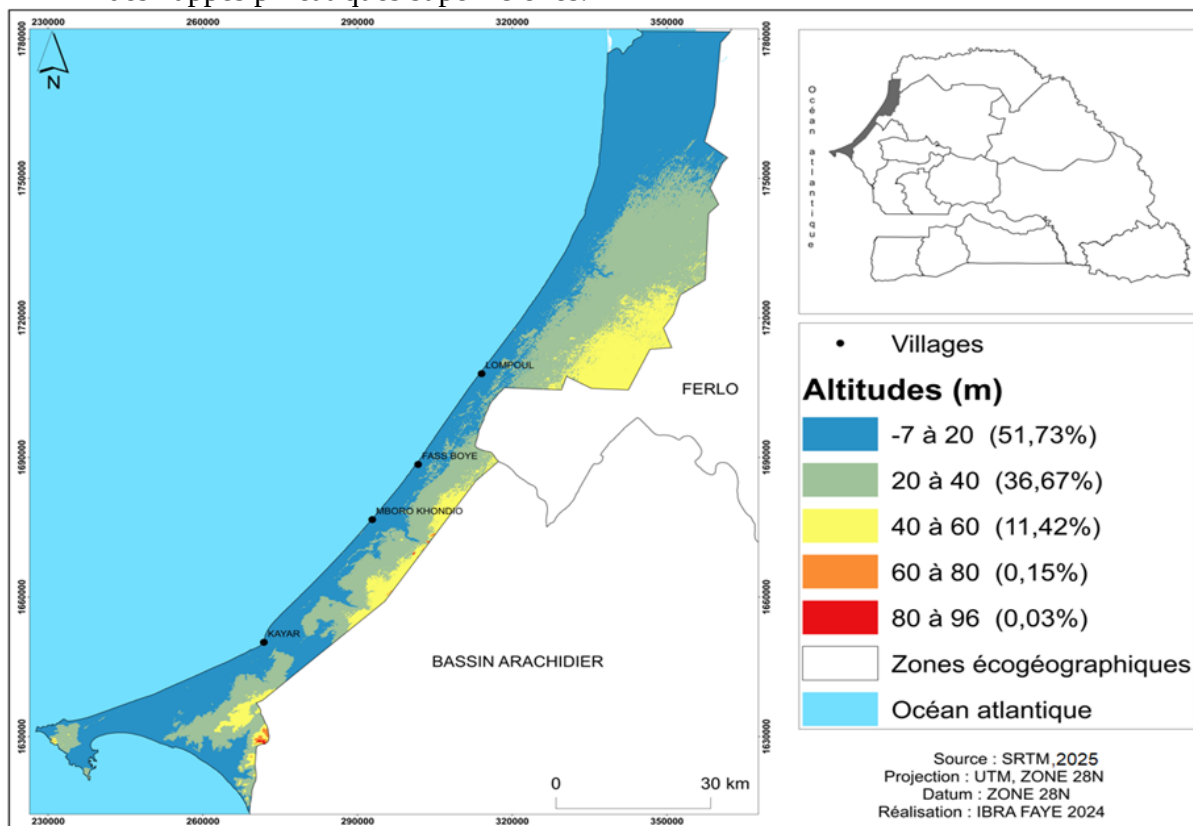


Figure 2 : Les altitudes par MNT dans les Niayes du Sénégal

La cartographie pédologique confirme la dominance des sols *diors* (sols ferrugineux tropicaux non lessivés), qui représentent environ 70 % de la superficie totale de la zone d'étude (figure 3). Les sols hydromorphes, localisés dans les dépressions inter-dunaires, couvrent 18 % de la zone et constituent le principal support des cultures maraîchères intensives. Les sols halomorphes affectent 8 % du territoire dans les zones basses proches du littoral, où les détections de l'indice de salinité par les images Sentinel-2 révèlent des valeurs supérieures à 0,12, indiquant une contamination saline significative. La biodiversité végétale est remarquable, avec 419 espèces recensées dont 13 espèces endémiques du Sénégal (CSE, 2020).

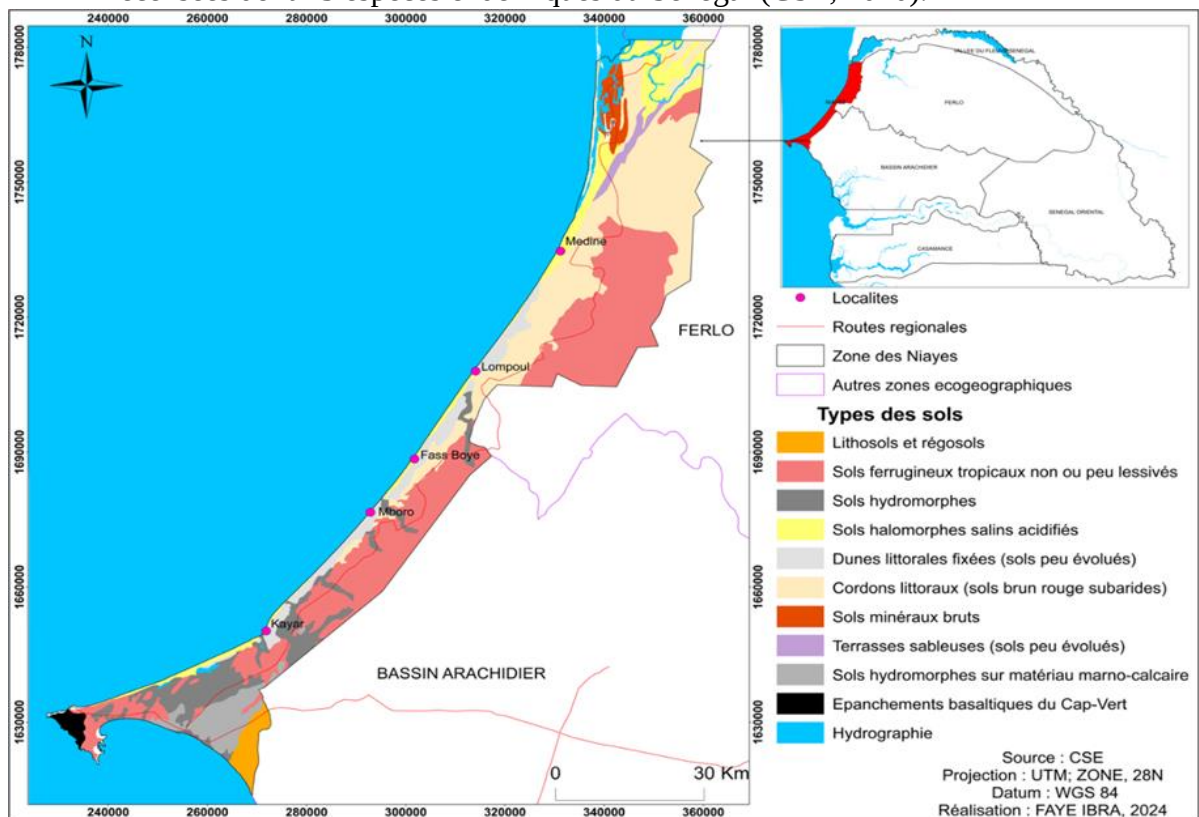


Figure 3 : Types de sols et de leur distribution spatiale dans les Niayes du Sénégal

Empreinte spatiale de l'exploitation minière

La cartographie diachronique des zones d'extraction minière, révèle une expansion spatiale continue et accélérée des fronts miniers sur plus d'un demi-siècle dans la zone d'étude englobant les localités de Diogo, Darou Khoudoss, Ngakham II, Ndary et Daf II (figure 4).

En 1973, les zones d'extraction minière ne couvraient que 690,02 ha, localisées de manière concentrée aux alentours de Darou Khoudoss, témoignant d'une activité encore embryonnaire.

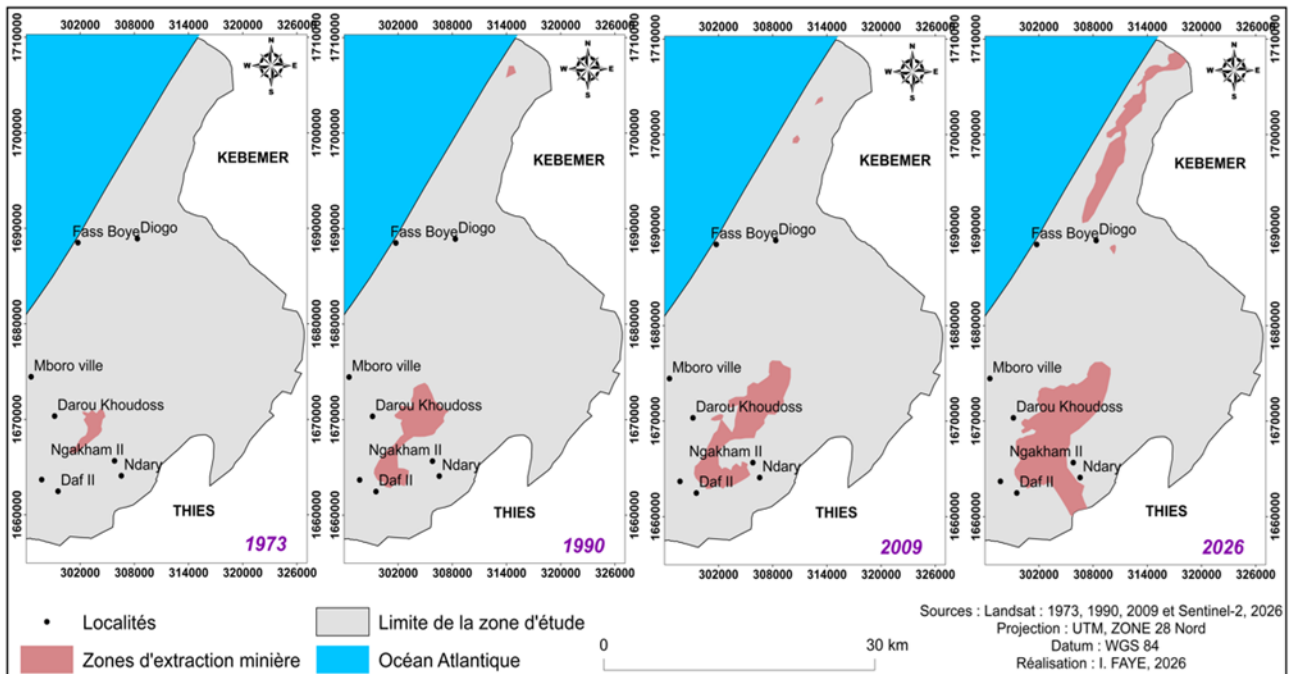


Figure 4 : Évolution de l'emprise des carrières minières dans les Niayes

Dès 1990, la superficie passe à 3 160,31 ha, soit une multiplication par 4,6 en dix-sept ans, marquant le démarrage de l'exploitation industrielle à grande échelle par les Industries Chimiques du Sénégal (ICS) dans le secteur de Darou Khoudoss (tableau 3).

Tableau 3 : Évolution des superficies des zones d'extraction minière entre 1973 et 2026

Années	Superficie en hectare			
	1973	1990	2009	2026
Zones d'extraction minière	690,02	3 160,31	4 978,96	10 799,34

Source : Traitements cartographiques, 2026

En 2009, l'emprise atteint 4 978,96 ha, enregistrant un accroissement supplémentaire de 1 818,65 ha par rapport à 1990. C'est toutefois entre 2009 et 2026 que l'expansion la plus spectaculaire est observée : les zones d'extraction atteignent 10 799,34 ha en 2026, soit plus du double de la superficie de 2009, sous l'effet conjugué des activités ICS et du démarrage de l'exploitation de la Grande Côte Operations (GCO) dans le secteur de Diogo, clairement visible sur la carte 2026 par l'émergence d'un front minier linéaire longeant le littoral atlantique.

Sur l'ensemble de la période 1973-2026, l'emprise spatiale totale a été multipliée, passant de 690,02 ha à 10 799,34 ha, soit un accroissement net de 10 109,32 ha de terres converties de manière irréversible.

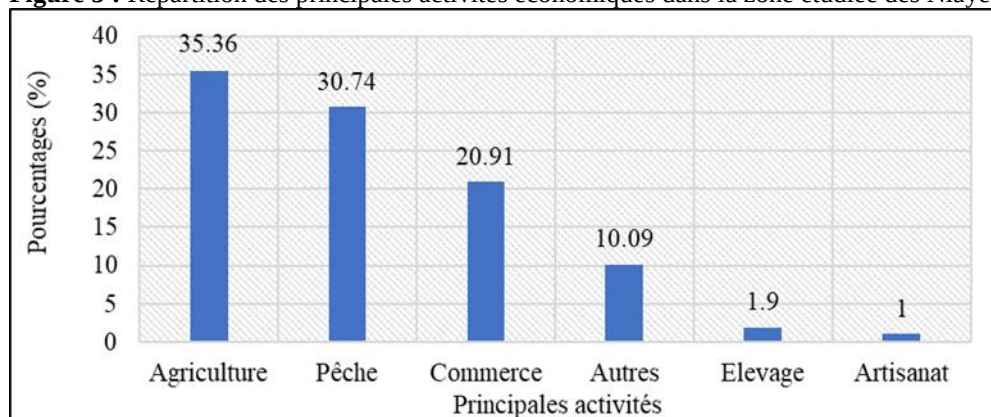
Ces résultats s'inscrivent dans la continuité des travaux de Seck et al. (2024) sur les mutations environnementales liées à la GCO à Diogo et des analyses de Seck et al. (2025) portant sur les transformations paysagères à Darou Khoudoss, confirmant l'ampleur des conversions foncières irréversibles induites par l'exploitation des minerais de zircon et d'ilménite dans cette portion du littoral sénégalais.

Systèmes de production : diversité et dynamiques

Profil des activités économiques

L'analyse des données d'enquêtes menées auprès des producteurs révèle une prédominance marquée des activités primaires dans l'économie locale des Niayes. L'agriculture constitue l'activité principale de 35,36 % des enquêtés, suivie par la pêche artisanale (30,74 %) et le commerce local (20,91 %). Les autres activités (transport, maçonnerie, petits services, tourisme local) représentent 10,09 %, tandis que l'élevage et l'artisanat demeurent très marginaux avec 1 % chacun (figure 5). Agriculture et pêche cumulent 66,1 % des actifs enquêtés, révélant une spécialisation des ménages dans les activités primaires directement dépendantes des ressources naturelles.

Figure 5 : Répartition des principales activités économiques dans la zone étudiée des Niayes

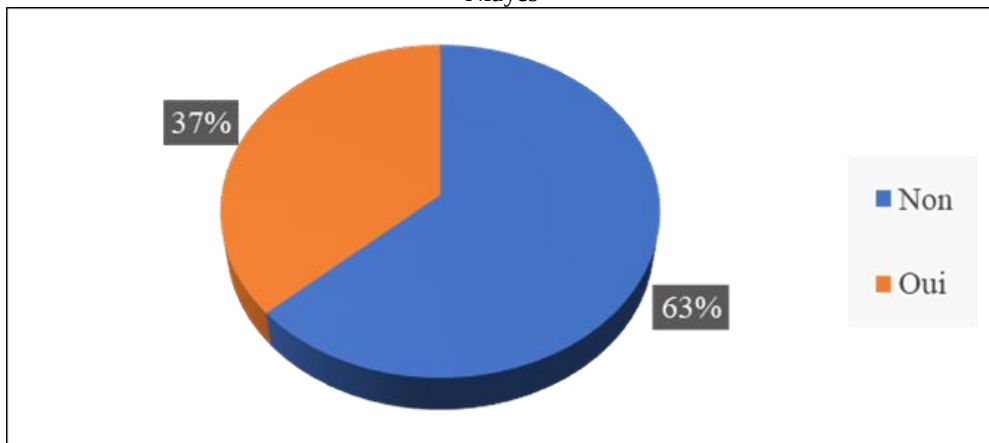


Source : Enquêtes de terrain, 2025

Diversification économique : un levier insuffisamment mobilisé

L'analyse de la diversification des moyens d'existence révèle que 63 % des enquêtés ne disposent d'aucune activité secondaire (figure 6), traduisant une fragilité structurelle des ménages face aux aléas climatiques et aux fluctuations des marchés. En revanche, 37 % des répondants exercent une activité secondaire, manifestant des stratégies d'adaptation économique déjà en cours mais encore insuffisamment étendues au regard des pressions identifiées.

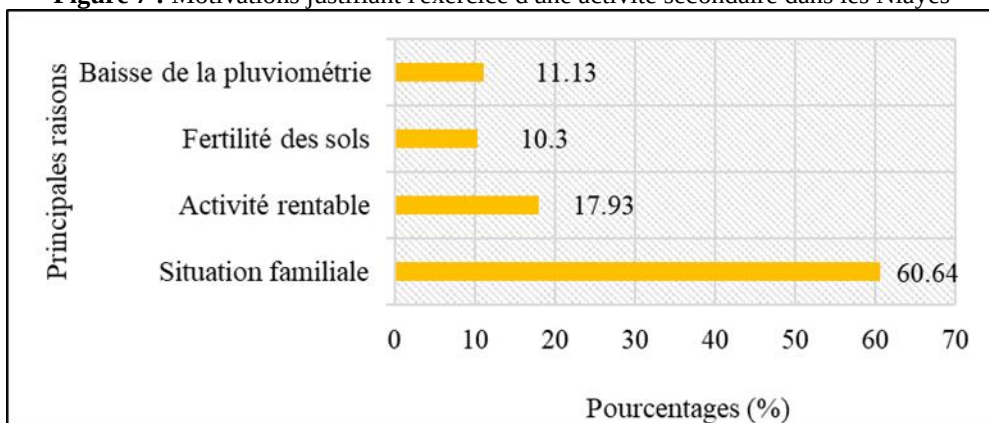
Figure 6 : Proportion des enquêtés avec et sans activité secondaire dans la zone étudiée des Niayes



Source : Enquêtes de terrain, 2025

Parmi les personnes pratiquant une activité secondaire, les motivations évoquées sont principalement d'ordre familial pour plus de 60 % d'entre elles. La rentabilité de l'activité secondaire est citée par 17,93 % des enquêtés, la baisse de la pluviométrie par 11,13 % et la fertilité des sols par 10 % (figure 7). Ce dernier résultat témoigne des liens étroits entre dynamiques environnementales et stratégies économiques d'adaptation des ménages.

Figure 7 : Motivations justifiant l'exercice d'une activité secondaire dans les Niayes



Source : Enquêtes de terrain, 2025

Typologies des systèmes de production

La classification ascendante hiérarchique (CAH) a permis d'identifier quatre profils typologiques de ménages dans les Niayes (tableau 4). Le groupe 1, les maraîchers intensifs dépendants (38 %), regroupe des ménages fortement spécialisés dans la production horticole irriguée, sans activité secondaire, très exposés aux risques de salinisation et aux variations

climatiques. Le groupe 2, les pêcheurs artisanaux (22 %), dépend essentiellement des ressources halieutiques marines et est particulièrement exposé à l'érosion côtière et à la surexploitation des stocks. Le groupe 3, les agropasteurs diversifiés (28 %), associe maraîchage, élevage et commerce, présentant une résilience plus élevée grâce à la pluriactivité. Le groupe 4, les ménages pluriactifs périurbains (12 %), combine activités agricoles avec des emplois dans les services, le transport ou les industries extractives.

Tableau 4 : Profils typologiques des systèmes de production dans les Niayes

Profil	Part	Caractéristiques principales	Niveau de vulnérabilité ICSVSE
Maraîchers intensifs dépendants	38 %	Spécialisation horticole irriguée, aucune activité secondaire	Très élevée (ICVSE > 0,60)
Pêcheurs artisanaux	22 %	Dépendance ressources marines, zone côtière (Kayar, Mboro)	Élevée à très élevée (ICVSE > 0,70)
Agropasteurs diversifiés	28 %	Pluriactivité : maraîchage, élevage, commerce	Modérée (ICVSE 0,40-0,60)
Ménages pluriactifs périurbains	12 %	Agriculture + emplois industrie/services/mines	Faible à modérée (ICVSE < 0,50)

Source : Enquêtes de terrain, 2025

Cartographie de l'Indice Composite de Vulnérabilité Socio-Écologique (ICVSE)

Distribution spatiale globale de la vulnérabilité

La cartographie de l'ICVSE révèle une vulnérabilité socio-écologique structurellement élevée dans l'ensemble de la zone étudiée (figure 8). La lecture spatiale de la carte met en évidence une prédominance marquée des classes de vulnérabilité élevée à très élevée, qui dominent la quasi-totalité de la superficie cartographiée, confirmant le caractère profondément fragilisé de ce socio-écosystème littoral.

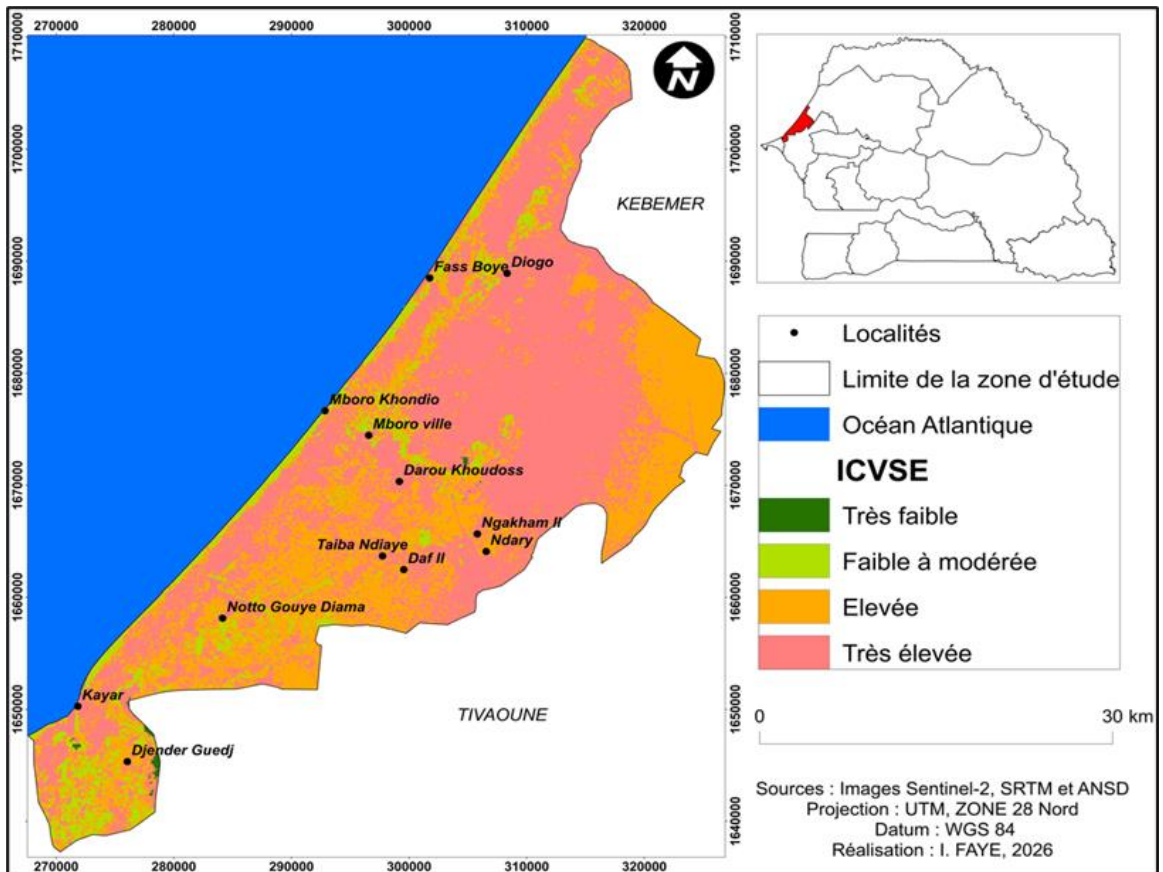


Figure 8 : Caractérisation de l'Indice Composite de Vulnérabilité Socio-Écologique (ICVSE)

La classe de vulnérabilité très élevée (ICVSE > 0,80) constitue la classe dominante. Elle couvre la majeure partie du territoire des Niayes étudié, s'étendant de manière continue sur la frange littorale occidentale, de Kayar au sud jusqu'aux localités de Fass Boye et Diogo au nord, ainsi qu'à travers les secteurs centraux du territoire. Cette dominance spatiale de la très haute vulnérabilité traduit la convergence simultanée de plusieurs facteurs aggravants : la faible altitude des dépressions inter-dunaires exposées aux intrusions marines, la dégradation avancée du couvert végétal, la forte densité de population dans les communes horticoles et la pression croissante de l'exploitation minière industrielle sur les ressources pédologiques et hydriques.

La classe de vulnérabilité élevée (ICVSE entre 0,60 et 0,80) constitue la deuxième classe en importance spatiale. Elle se localise principalement dans les secteurs de transition entre la frange littorale et les plateaux de Thiès, notamment dans les communes de Taïba Ndiaye, Daf II, Ngakham II et Ndary,

ainsi que dans la partie méridionale de la zone autour de Notto Gouye Diama et Djiender Guedj. Ces espaces, bien qu'exposés à des pressions moindres que la frange littorale, subissent néanmoins des tensions foncières importantes liées à l'expansion des périmètres miniers des ICS et à la pression démographique croissante des communes périurbaines du département de Tivaouane.

Les classes de vulnérabilité faible à modérée (ICVSE entre 0,20 et 0,60) apparaissent de manière très fragmentée et localisée sous forme de petites taches dispersées au sein d'une matrice de vulnérabilité élevée à très élevée. Ces îlots de moindre vulnérabilité correspondent essentiellement aux secteurs où la couverture végétale est encore relativement préservée, notamment les reliques de formations dunaires fixées par la végétation naturelle et les périmètres forestiers protégés de la bande de filaos. La classe de vulnérabilité très faible (ICVSE < 0,20) est quasi absente du territoire cartographié, se limitant à quelques pixels isolés sans continuité spatiale significative, ce qui témoigne de l'absence de zones véritablement résilientes dans la zone des Niayes étudiée.

La lecture globale de la carte ICVSE révèle deux gradients structurants de la vulnérabilité socio-écologique dans les Niayes. Un gradient côte-intérieur, orienté Ouest-Est, oppose la frange littorale de très haute vulnérabilité aux secteurs intérieurs légèrement moins exposés. Ce gradient traduit le rôle structurant de la proximité à l'océan et de la faible altitude dans la détermination de la vulnérabilité physique du territoire. Un gradient nord-sud, plus atténué, oppose les communes du nord (Fass Boye, Diogo) soumises à l'impact direct de la GCO, aux communes méridionales (Kayar, Djiender Guedj) davantage exposées à la pression démographique et à la dégradation du littoral par l'érosion côtière.

Ces résultats confirment la nature multifactorielle et spatialement différenciée de la vulnérabilité socio-écologique du territoire étudié des Niayes, et soulignent la nécessité d'une gestion territoriale adaptée aux spécificités de chaque secteur. L'absence quasi totale de zones à vulnérabilité faible ou très faible constitue le résultat le plus préoccupant de cette analyse, indiquant que l'ensemble du territoire des Niayes étudié se trouve dans un état de tension socio-écologique avancée qui appelle des interventions urgentes et différenciées.

Discussion

Une vulnérabilité multiscalaire et multicausale

Les résultats de cette étude confirment et approfondissent les constats documentés dans la littérature sur les transformations des socio-écosystèmes côtiers en Afrique de l'Ouest. La convergence des pressions démographiques, environnementales et anthropiques génère une vulnérabilité socio-écologique

structurelle qui ne peut être appréhendée par l'analyse d'un seul facteur. À l'instar de Tappan et al. (2004) qui documentaient les tendances d'érosion pédologique au Sénégal il y a deux décennies, nos résultats révèlent une accélération préoccupante de ces dynamiques, portée par l'urbanisation non planifiée et l'intensification des pratiques extractives. La domination de la classe de vulnérabilité très élevée sur l'ensemble du territoire cartographié constitue un signal d'alarme inédit dans la littérature sur les Niayes.

La forte dépendance aux activités primaires, agriculture et pêche cumulant 66,1 % des actifs enquêtés, constitue un facteur de vulnérabilité économique majeur. Ce résultat fait écho aux observations de Sagna et al. (2014) et de Ndour et al. (2020), qui soulignaient la fragilité des moyens de subsistance dans un contexte de dégradation des ressources. La faible diversification économique, révélée par 63 % des ménages sans activité secondaire, amplifie cette exposition aux risques environnementaux et économiques.

L'exploitation minière : entre apport économique et fragilisation écologique

Les impacts spatiaux de l'exploitation minière constituent l'un des résultats les plus significatifs de cette étude. La dénudation des sols mesurée par télédétection ($BSI > 0,40$) et la disparition de la végétation naturelle ($NDVI < 0,05$) dans les périmètres extractifs confirment les observations de Seck et al. (2024) sur les mutations environnementales liées à la GCO à Diogo, et de Seck et al. (2025) sur l'exploitation à ciel ouvert à Darou Khoudoss. Si l'exploitation minière génère des emplois et contribue aux revenus locaux, ses impacts environnementaux apparaissent disproportionnés par rapport aux retombées locales, notamment en termes de conversion irréversible des terres agricoles, de pollution des nappes phréatiques et de fragmentation des écosystèmes dunaires (Diallo, 2017).

La diversification économique comme levier de résilience sous-exploité

La faible proportion de ménages disposant d'une activité secondaire (37 %) contraste avec les besoins de résilience documentés dans la littérature sur les zones humides d'Afrique de l'Ouest. Des études conduites dans des contextes similaires, notamment au delta intérieur du Niger (Scoones, 1998) et dans les zones agropastorales du Ferlo sénégalais (Tall et al., 2020), montrent que la pluriactivité constitue le principal mécanisme d'adaptation face aux aléas climatiques et économiques. La situation des Niayes, où la mono-dépendance aux activités primaires est structurelle, appelle des politiques publiques ciblées visant à élargir le spectre des opportunités économiques disponibles.

Limites et perspectives

Cette étude présente plusieurs limites à prendre en compte. La construction de l'ICVSE par méthode AHP implique une part de subjectivité dans l'attribution des poids aux composantes, bien que la transparence de la matrice de comparaison permette la reproductibilité et l'adaptation de la méthode. Les données d'enquêtes, bien que substantielles ($n = 390$), sont susceptibles de biais de déclaration. Enfin, l'absence de données à fine résolution sur la densité de population (WorldPop, 2026) constitue une limite dans un territoire à forte dynamique démographique. En perspective, la modélisation prospective de l'ICVSE à l'horizon 2050 sous différents scénarios de changement climatique et d'évolution des usages des sols constituerait une avancée majeure pour l'aide à la décision territoriale.

Conclusion

Cet article a proposé une analyse intégrée de la vulnérabilité socio-écologique des Niayes du Sénégal, en articulant la construction d'un Indice Composite de Vulnérabilité Socio-Écologique (ICVSE) par méthode AHP et télédétection (Sentinel-2) avec des enquêtes de terrain conduites auprès de 390 producteurs. Quatre enseignements principaux se dégagent.

Premièrement, la cartographie de l'ICVSE révèle une domination structurelle des classes de vulnérabilité élevée à très élevée sur l'ensemble du territoire des Niayes, avec une absence quasi totale de zones résilientes, constituant un résultat inédit et préoccupant. Deuxièmement, la forte dépendance aux activités primaires et la faible diversification économique (63 % des ménages sans activité secondaire) constituent les facteurs centraux de vulnérabilité socio-économique. Troisièmement, l'exploitation minière industrielle (ICS, GCO) génère des empreintes paysagères mesurables par télédétection ($BSI > 0,40$, $NDVI < 0,05$), confirmant une conversion irréversible des terres agricoles et une dégradation des écosystèmes naturels. Quatrièmement, l'approche intégrée de l'ICVSE et les enquêtes de terrain constitue un cadre analytique transférable à d'autres zones humides côtières d'Afrique de l'Ouest.

Ces résultats appellent la mise en œuvre de politiques territoriales articulées autour de quatre leviers prioritaires : le renforcement de la diversification économique des ménages agricoles par des programmes de formation ciblés ; la mise en place d'un zonage agroécologique opposable protégeant les dépressions maraîchères face à l'expansion urbaine et industrielle ; la réglementation de l'exploitation des eaux souterraines pour prévenir la salinisation des nappes ; et l'intégration de la carte ICVSE dans les Plans Locaux de Développement des communes des Niayes.

Sur le plan des perspectives de recherche, plusieurs pistes méritent d'être explorées. D'abord, le suivi diachronique de l'ICVSE à travers des séries

temporelles d'images satellitaires permettrait d'évaluer l'évolution de la vulnérabilité sous l'effet conjugué des changements climatiques et des dynamiques d'occupation des sols. Ensuite, l'intégration de variables climatiques fines notamment les projections de précipitations et de températures issues des modèles régionaux du GIEC renforcerait la dimension prospective du cadre analytique développé. Par ailleurs, une modélisation des trajectoires de vulnérabilité à l'horizon 2050 constituerait un outil d'aide à la décision particulièrement pertinent pour les politiques d'adaptation. Enfin, la transférabilité de l'approche ICVSE à d'autres zones humides côtières d'Afrique de l'Ouest, telles que le delta du Sine-Saloum au Sénégal ou le delta intérieur du Niger au Mali, ouvre des perspectives comparatives prometteuses pour mieux appréhender les dynamiques de vulnérabilité socio-écologique à l'échelle régionale.

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 : Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

References:

1. Adger, W. N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), 268-281.
2. Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD). (2023). *Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Élevage* (Rapport final, 541 p.).
3. Barusseau, J.-P., Diaw, A. T., Sall, M., Thior, M., Sy, O., & Diadhiou, H. D. (2019). Dynamique sédimentaire et évolution du littoral de la Grande Côte du Sénégal. *Revue de Géomorphologie Dynamique*, 68(2), 89-112.
4. Centre de Suivi Écologique (CSE). (2020). *État de l'environnement au Sénégal* (280 p.).
5. Congalton, R. G., & Green, K. (2009). *Assessing the accuracy of remotely sensed data : Principles and practices* (2e éd.). CRC Press.
6. Dème, A. (2021). *Vulnérabilité côtière et dynamiques paysagères dans les Niayes du Sénégal* [Thèse de doctorat, Université Assane Seck de Ziguinchor].
7. Dia, S. (2000). *Les Niayes du Nord, évolution d'une région littorale en crise* [Thèse de doctorat, Université de Rouen, 438 p.].

8. Diallo, M. L. (2017). L'industrie du phosphate de Taïba au Sénégal : front minier et tensions locales. *Open Edition Journals* (33 p.).
9. Direction des Parcs Nationaux (DPN). (2022). *Plan d'aménagement écologique de la bande des Niayes* (277 p.).
10. Dryade. (1990). *Étude du plan d'aménagement et de gestion des Niayes* (Rapport final).
11. Fall, A. S., Fall, S. T., Cisse, I., Badiane, A. N., Diao, M. B., & Fall, C. A. (2001). *Caractérisation de la zone des Niayes* (7 p.). CRDI.
12. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). (2017). *Adaptation de l'agriculture au changement climatique au Sénégal : cas des zones côtières* (184 p.).
13. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). (2022). *Pratiques agroforestières à haut potentiel pour l'adaptation aux changements climatiques dans les systèmes agricoles au Sénégal* (12 p.).
14. Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80, 185-201.
15. Füssel, H.-M., & Klein, R. J. T. (2006). Climate change vulnerability assessments : An evolution of conceptual thinking. *Climatic Change*, 75(3), 301-329.
16. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2022). *Changements climatiques 2022 : Impacts, adaptation et vulnérabilité*. Cambridge University Press.
17. Goudiaby, A. (2021). *Mutations territoriales et recompositions foncières au Sénégal* [Thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop].
18. Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA). (2020). *Rapport annuel sur la sécurité alimentaire et la productivité maraîchère au Sénégal* (54 p.).
19. Kessler, S., & Tine, V. (2004). *Influences industrielles à l'interface urbain rural, l'impact des ICS sur la zone de Mboro, Sénégal* (39 p.). Ecocité.
20. Magnan, A. (2009). *La vulnérabilité des territoires littoraux au changement climatique* (30 p.). IDDRI.
21. McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17.
22. Michel, P. (1973). *Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie : Étude géomorphologique*. ORSTOM.
23. Ndao, M. (2012). *Dynamiques et gestions environnementales de 1970 à 2010 des zones humides au Sénégal* [Thèse de doctorat, Université Toulouse le Mirail / Université de Saint-Louis, 372 p.].

24. Ndour, N., Sarr, M., & Gaye, A. (2020). Diversité floristique et dynamique des écosystèmes dans la zone des Niayes. *Bulletin de la Société Botanique de l'Ouest Africain*, 18, 22-34.
25. Organisation Internationale pour les Migrations (OIM). (2023). *Impact de la dégradation environnementale et du changement climatique sur la mobilité humaine au Sénégal* (94 p.).
26. Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD). (2020). *Profil socioéconomique du Sénégal* (36 p.).
27. Sagna, P., Ndiaye, O., Diop, C., Mbaye, I., & Gaye, A. T. (2014). Récents changements climatiques de la zone des Niayes du Sénégal. *Revue de Géographie du Laboratoire Leïdi*, 12, 1-23.
28. Scoones, I. (1998). *Sustainable rural livelihoods : a framework for analysis* (IDS Working Paper, 22 p.).
29. Seck, H. M., Dieye, E. H. B., Solly, B., & Sane, T. (2024). Extraction minière et conséquences socio-économiques dans les collectivités locales riveraines : exemple des ICS. *Afriquesciences*, 20(1).
30. Seck, H. M., Dieye, E. H. B., Sane, T., & Faye, B. (2025). Mutations environnementales de l'exploitation minière à ciel ouvert sur le littoral de la commune de Darou Khoudoss (Sénégal). *Revue Géotrope*, 2, 230-242.
31. Sylla, F. (2021). Femmes, transformation agroalimentaire et organisation socioéconomique dans les Niayes. *Revue Africaine du Genre et du Développement*, 7(1).
32. Tall, A., Ba, F., & Diop, M. (2020). Aménagement urbain et durabilité environnementale dans les Niayes. *Revue Africaine des Sciences Sociales*, 18, 87-108.
33. Tappan, G. G., Sall, M., Wood, E. C., & Cushing, M. (2004). Ecoregions and land cover trends in Senegal. *Journal of Arid Environments*, 59.
34. Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150.
35. Turner, B. L., Lambin, E. F., & Reenberg, A. (2007). The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *PNAS*, 104(52), 20666-20671.
36. Fonds des Nations Unies pour la Population (UNFPA). (2022). *Rapport sur l'état de la population du Sénégal* (15 p.).
37. Xu, H. (2006). Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27.

Appendix

Script Google Earth Engine (GEE) pour le calcul des indices spectraux et de l'ICVSE

Le script ci-dessous synthétise le workflow Google Earth Engine (GEE) utilisé pour le prétraitement des images Sentinel-2, le calcul des cinq indices spectraux (NDVI, NDWI, BSI, SI, SMI) et la construction de l'Indice Composite de Vulnérabilité Socio-Écologique (ICVSE). La période de couverture retenue est novembre 2025 – avril 2026 (saison sèche). Les images Sentinel-2 SR Harmonised (niveau 2A) ont été filtrées pour un taux de nuages inférieur à 10 % et une mosaïque médiane sans nuages a été produite après masquage par l'algorithme QA60. Le MNT SRTM (résolution 30 m) a été utilisé pour les variables d'altitude et de pente. Les données de densité de population WorldPop 2020 (résolution 100 m) ont été rééchantillonnées à 30 m par interpolation bilinéaire. Chaque variable a été normalisée par la méthode min-max sur l'emprise de la zone d'étude avant agrégation pondérée selon les coefficients AHP valides (RC = 0,008).

```
// ICVSE - Niayes | GEE Script | Faye et al. 2026 | LGE-UASZ var aoi =  
ee.FeatureCollection('users/ibraFaye/niayes_boundary'); var s2 =  
ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED')  
.filterBounds(aoi).filterDate('2025-11-01','2026-04-30')  
.filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 10))  
.map(function(img){ var qa=img.select('QA60'); var  
mask=qa.bitwiseAnd(1<<10).eq(0).and(qa.bitwiseAnd(1<<11).eq(0));  
return img.updateMask(mask).divide(10000);}).median().clip(aoi); var  
ndvi=s2.normalizedDifference(['B8','B4']).rename('NDVI'); var  
ndwi=s2.normalizedDifference(['B3','B8']).rename('NDWI'); var  
bsi=s2.expression('((MIR+R)-(NIR+B))/((MIR+R)+(NIR+B))',  
{MIR:s2.select('B11'),R:s2.select('B4'),NIR:s2.select('B8'),B:s2.select('B2')}  
).rename('BSI'); var  
si=s2.select('B4').multiply(s2.select('B3')).sqrt().rename('SI'); var  
smi=s2.normalizedDifference(['B8','B12']).rename('SMI'); var  
dem=ee.Image('USGS/SRTMGL1_003').clip(aoi); var  
slope=ee.Terrain.slope(dem); function mmNorm(img){ var  
k=img.bandNames().get(0); var  
s=img.reduceRegion({reducer:ee.Reducer.minMax(),geometry:aoi,scale:30,  
maxPixels:1e10}); return  
img.subtract(ee.Number(s.get(ee.String(k).cat('_min'))))  
.divide(ee.Number(s.get(ee.String(k).cat('_max'))))  
.subtract(ee.Number(s.get(ee.String(k).cat('_min'))))));} var  
pop=ee.Image('WorldPop/GP/100m/pop/SEN_2020').resample('bilinear')
```

```
.reproject({crs:'EPSG:32628',scale:30}).clip(aoi); var  
distOcean=ee.Image('JRC/GSW1_4/GlobalSurfaceWater').select('max_exten  
t')  
.fastDistanceTransform().sqrt().multiply(ee.Image.pixelArea().sqrt()); var  
roads=ee.FeatureCollection('users/ibraFaye/osm_roads_niayes'); var  
distRoads=ee.Image(1).paint(roads).fastDistanceTransform().sqrt()  
.multiply(ee.Image.pixelArea().sqrt()); var  
c1=mmNorm(dem.rename('alt')).multiply(0.4)  
.add(mmNorm(slope.rename('sl')).multiply(0.3))  
.add(mmNorm(distOcean.rename('doc')).multiply(-1).add(1).multiply(0.3));  
var c2=mmNorm(ndvi.multiply(-  
1).add(1).rename('invNDVI')).multiply(0.25)  
.add(mmNorm(bsi).multiply(0.25)).add(mmNorm(si).multiply(0.20))  
.add(mmNorm(pop.rename('pop')).multiply(0.15))  
.add(mmNorm(ndwi.multiply(-  
1).add(1).rename('invNDWI')).multiply(0.15)); var  
c3=mmNorm(distRoads.rename('dr')).multiply(-1).add(1).multiply(0.40)  
.add(mmNorm(smi).multiply(0.35)).add(mmNorm(dem.rename('alt2')).multi  
ply(0.25)); var  
icvse=c1.multiply(0.25).add(c2.multiply(0.35)).add(c3.multiply(0.40))  
.rename('ICVSE').clip(aoi);  
Export.image.toDrive({image:icvse,description:'ICVSE_Niayes_2026',  
scale:30,region:aoi,maxPixels:1e13,fileFormat:'GeoTIFF',crs:'EPSG:32628'}  
);
```

Note : La classification finale en quatre classes a été effectuée sous ArcGIS 10.8 par la méthode des seuils naturels (Jenks). Référence additionnelle : Saaty, T. L. (1980). The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, New York.