

SALINISATION-ACIDIFICATION ET RISQUE D'ÉROSION HYDRIQUE DES SOLS DANS LE DÉPARTEMENT DE FOUNDIOUGNE, SÉNÉGAL : APPROCHE PAR TÉLÉDÉTECTION ET SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE-SIG

Dome TINE^{1*}, Mbagnick FAYE², Amadou Abou SY³
et Guilgane FAYE⁴

¹ Université Cheikh Anta DIOP, Département de Géographie, Laboratoire de
Télétection Appliquée (LTA), BP 5005 Dakar, Sénégal

² Université Cheikh Anta DIOP, Département de Géographie, Laboratoire de
Climatologie et d'Etudes Environnementales (LCE), BP 5005 Dakar, Sénégal

³ Université Cheikh Anta DIOP, Faculté des Lettres et Sciences Humaines,
Département de Géographie, BP 5005 Dakar, Sénégal

⁴ Université Cheikh Anta DIOP, Département de Géographie, Laboratoire de
Géographie Physique, BP 5005 Dakar, Sénégal

(reçu le 23 Janvier 2023; accepté le 05 Juin 2023)

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

RÉSUMÉ

La salinisation, l'acidification et l'érosion hydrique constituent les principaux facteurs de dégradation des terres dans le Sine-Saloum particulièrement dans le département de Foundiougne. L'extension des terres salées évoluant vers de véritables tannes ainsi que leur acidification n'est plus à démontrer et restent liées à la variabilité climatique. L'agressivité des pluies entraîne également un décapage des sols qui se traduit par un risque d'érosion hydrique. L'objectif de cette contribution est de caractériser le processus de salinisation-acidification ainsi que le risque d'érosion hydrique dans le département de Foundiougne. La méthodologie adoptée repose sur une analyse spatiale des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines et des sols, une cartographie de la dynamique de l'occupation du sol et une évaluation de l'érosion hydrique à l'aide du model PAP-CAR. Les résultats montrent une forte salinité des eaux souterraines et des sols au niveau de l'estuaire et au nord de la région avec une conductivité électrique supérieure à 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La cartographie de l'occupation du sol montre qu'entre 1986 et 2020, les terres salées sont passées de 4,97 % à 5,97 %. Aussi, 40 % de la superficie du département de Foundiougne présentent un risque d'érosion hydrique très élevé.

Mots-clés : salinisation, acidification, érosion, terres salées, PAP-CAR, Foundiougne.

ABSTRACT

Salinisation-acidification and risk of soil erosion in Foundiougne Department, Senegal : remote sensing and geographic information system-GIS approach

Salinisation, acidification and water erosion are the main factors of land degradation in the Sine-Saloum, particularly in the department of Foundiougne. The extension of saline lands evolving towards real tans as well as their acidification is no longer to be demonstrated and remains linked to climatic variability. The aggressiveness of rainfall also leads to soil stripping, which results in a risk of water erosion. The objective of this contribution is to characterise the salinisation-acidification process and the risk of water erosion in the department of Foundiougne. The methodology adopted is based on a spatial analysis of groundwater and soil physico-chemical parameters, a mapping of land use dynamics and an evaluation of water erosion using the PAP-CAR model. The results show high groundwater and soil salinity in the estuary and in the north of the region with electrical conductivity above 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Land use mapping shows that between 1986 and 2020, saline land has increased from 4.97 % to 5.97 %. Thus, 40 % of the area of the Foundiougne department is at high risk of water erosion.

Keywords : *salinisation, acidification, erosion, saline land, PAP-CAR, Foundiougne.*

I - INTRODUCTION

L'insuffisance des ressources en sols pour répondre aux besoins croissants des populations rurales en produits agricoles est l'un des aspects cruciaux du problème de l'insécurité alimentaire à l'échelle mondiale. Les sols fertiles sont aujourd'hui rares et menacés de dégradation [1] par des phénomènes physiques, chimiques et anthropiques. Cette situation s'est produite dans un contexte de changement climatique défavorable [2] et d'une croissance démographique accélérée. La sécheresse des années 1970 caractérisée par des déficits pluviométriques et un assèchement des terres agricoles, a accentué la salinisation et la sensibilité des terres à l'érosion [3]. Le département de Foundiougne, à l'instar de la zone éco-géographique du Sine Saloum jadis, bénéficiant des conditions physiques propices à l'agriculture, est cependant, soumise aux facteurs de dégradations des ressources naturelles (eau, sol). Ces effets néfastes ne se limitent pas seulement au monde rural. Ils affectent également toute l'économie nationale essentiellement tributaire du secteur primaire. Réputée être le poumon de l'économie de la région du Sine Saloum grâce à la fertilité des terres et une pluviométrie régulière, l'agriculture connaît depuis des décennies des contraintes liées à la dégradation de l'environnement.

De ces contraintes, découle une salinisation qui prend de plus en plus de l'ampleur malgré les nombreux projets et programmes réalisés et ou en cours pour l'endiguer. Le rythme des agents d'érosion et la salinisation des terres qui se présentent avec un degré d'avancement élevé des tannes freinent l'extension des terres cultivables. Le phénomène de salinisation intense s'est signalé au Sénégal dans les années 1920 à la suite de la péjoration des conditions climatiques [4]. Les déficits pluviométriques et l'évaporation intense, ont entraîné une extension de la superficie des terres salées et acidifiées. Cette acidification est liée à l'accumulation d'importantes quantités de sels à la surface des sols et de l'oxydation de la pyrite des sédiments. Le processus de salinisation revêt une complexité telle qu'il suscite plusieurs tentatives d'amélioration de sa compréhension et d'estimation de son ampleur. Les zones les plus menacées sont celles à climat aride à semi-aride [5]. Depuis les sécheresses qui se sont succédées, le Sénégal a connu une dégradation de ses ressources naturelles dont les types les plus marqués, dans les régions de Fatick et de Kaolack, sont, entre autres, la salinisation des terres et l'érosion des sols. Au niveau du fleuve Saloum, cette sécheresse hydrologique a fait reculer les limites tidales et les fronts de salinités remontent parfois loin en amont [6]. La dessiccation du substrat géologique est accompagnée de la sursalure des sols et une dynamique érosive des vents sur les tannes et les terres sableuses. Les régimes de salinité varient d'amont en aval en fonction des caractères climatiques et des débits fluviaux. Les apports en eaux douces sont faibles et l'évaporation intense entraîne l'hypersalinisation des cours d'eau. Dans cette étude, il s'agit de caractériser la salinisation, l'acidification et d'évaluer le risque d'érosion hydrique des sols dans le département de Foundiougne. Le travail effectué repose sur une approche cartographique et statistique.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

La démarche méthodologique s'appuie sur des observations sur le terrain, des analyses physico-chimiques des eaux et des sols et l'analyse de la dynamique de l'occupation du sol à l'aide des images satellitaires Landsat TM (1986) et OLI (2020).

II-1. Zone d'étude

Le département de Foundiougne est situé dans la région de Fatick entre les latitudes 13°40' et 14°10' Nord et les longitudes 16°40' et 16°10' Ouest (**Figure 1**). Il couvre une superficie de 2 959 km². Il est caractérisé par trois principaux cours d'eau dont le Saloum, le Diombos et le Bandiala qui se jettent dans l'Océan atlantique à partir de la pointe de Sangomar. Cette partie dénommée estuaire du Saloum, est caractérisée par un réseau de rias et une multitude de chenaux d'eau salée (bolongs) dont les apports en eau douce sont

presque nuls en raison de la succession des déficits pluviométriques. L'histoire géologique s'inscrit dans le contexte du bassin sédimentaire sénégalo-mauritanien. Les fluctuations climatiques au cours du Quaternaire ont régi les principales phases de la morphogénèse. Les formations géologiques sont constituées de sédiments du Quaternaire et des formations du Continental Terminal. Les ressources pédologiques sont formées de sols ferrugineux tropicaux, de sols hydromorphes et de sols halomorphes. 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 et une saison pluvieuse de juillet à octobre.

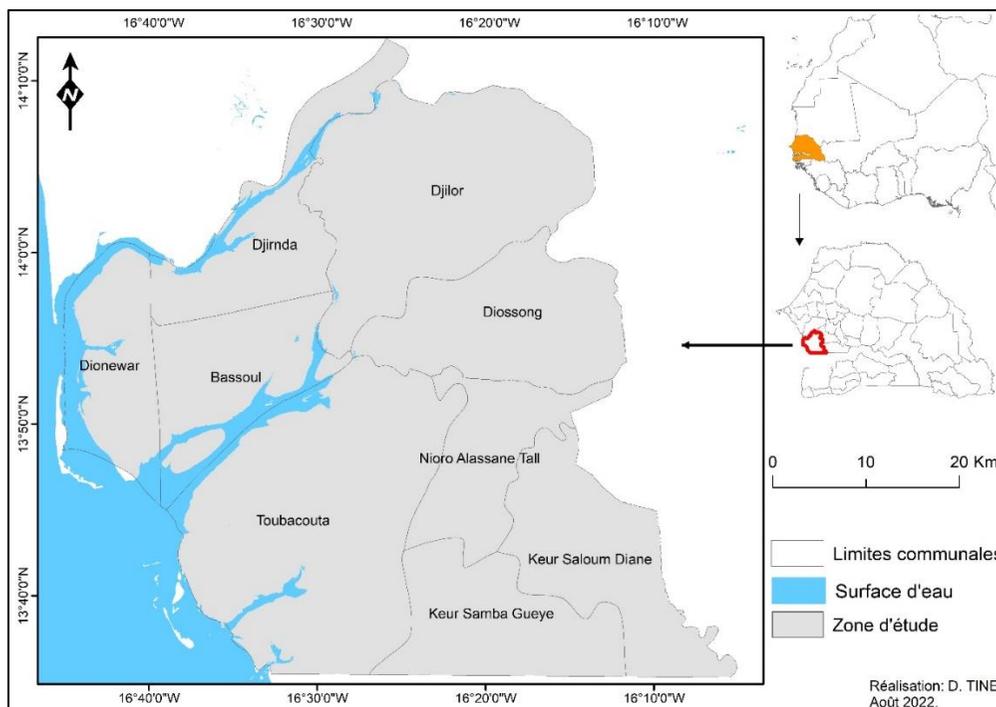


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude

II-2. Étude de la salinité des eaux et des sols

Les mesures de la salinité des eaux de nappe et de l'acidité des sols ont été effectuées en saison non pluvieuse (avril et mai 2017). Le choix des sites de prélèvement des échantillons a pris en compte le réseau hydrographique, la nappe phréatique, le réseau routier pour l'accessibilité, la répartition de l'habitat et l'occupation des sols. C'est ainsi que le choix des sites est fait suivant un maillage carré de 25 x 25 km. Les mesures effectuées sur les eaux souterraines, sont réalisées sur 52 sites contre 433 pour les sols (**Tableau 1**).

L'analyse des paramètres physico-chimiques de la nappe phréatique est réalisée à l'aide d'un matériel composé de :

- 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.
- Un pH-mètre, qui a permis de mesurer les valeurs de pH des eaux.

Tableau 1 : Nombre d'échantillons par localité dans la zone d'étude

Sites	Nombre de puits	Echantillons de sol
Dionwar	3	11
Djirnda	3	20
Bassoul	3	27
Toubacouta	20	60
Djilor	12	138
Diossong	7	25
Nioro Alassane Tall	4	32
Keur Samba Gueye	-	77
Keur Saloum Diané	-	43
Total	52	433

II-3. Analyses de laboratoire

Les échantillons de sol (433 points) prélevés ont été portés au laboratoire pour des analyses de conductivité électrique (CE) et de potentiel hydrogène (pH). L'interprétation des résultats obtenus est faite sur la base de l'échelle d'interprétation (**Tableau 2**) de Durand (1983).

Tableau 2 : Échelle d'interprétation du pH et du CE des eaux et des sols en fonction de leur degré de salinité [7]

pH	Interprétation	CE (μS)	Interprétation
< 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	-	-

II-4. Données satellitaires

Deux images Landsat acquises en 1986 et 2020 à partir du site web de l'USGS (<http://landsat.usgs.gov/>) ont été utilisées (**Tableau 3**). Une série de correction est appliquée sur les images dans l'optique d'augmenter la qualité de l'information et minimiser l'incertitude sur les données qui est due, aux perturbations atmosphériques, aux mouvements du satellite sur son orbite et parfois des problèmes liés au capteur [4]. Le traitement des données est effectué à l'aide du tableur Excel, du logiciel de cartographie, ArcGIS 10.2 et du logiciel de traitement d'image ENVI 5.3.

Tableau 3 : Caractéristiques des images Landsat utilisées

Capteurs	Date d'acquisition	Bandes	Longueurs d'onde	Résolution
TM	1986	1- Bleu	0,45-0,52 μm	30 m
		2- Vert	0,52-0,6 μm	
		3- Rouge	0,63-0,69 μm	
		4- PIR	0,76-0,9 μm	
		5- SWIR 1	1,55-1,75 μm	
		7- SWIR 2	2,08-2,35 μm	
Capteurs	Date d'acquisition	Bandes	Longueurs d'onde	Résolution
OLI	2020	2- Bleu	0,45-0,51 μm	30 m
		3- Vert	0,52-0,60 μm	
		4- Rouge	0,63-0,68 μm	
		5- PIR	0,84-0,88 μm	
		6- SWIR 1	1,56-1,66 μm	
		7- SWIR 2	2,10-2,30 μm	

II-5. Classification des images satellitaires

Pour générer les cartes d'occupation du sol, la méthode de classification supervisée a été utilisée. Cette technique est basée sur les signatures spectrales des différents éléments caractéristiques des images. Elle est utilisée pour identifier les zones spectralement similaires sur une image. Il s'agit d'identifier d'abord les sites d'entraînement c'est-à-dire les échantillons assez homogènes sur l'image et représentatifs de différents types de surfaces. Ces échantillons sont ensuite utilisés pour définir les classes spectrales qu'ils représentent. Il existe au sein de la classification supervisée plusieurs algorithmes de classification. Cependant, nous avons choisi, dans le cadre de cette étude, la classification par « maximum de vraisemblance ». Ce dernier est très utilisé dans les classifications supervisées et est considéré comme le plus performant dans la production des cartes thématiques dans le domaine de l'occupation du sol [8].

II-6. Validation des résultats de la classification

La validation d'une classification est un procédé basé sur la collecte des sites de vérité-terrain pour chaque classe identifiée. Cette étape est indispensable pour évaluer les erreurs des classifications à partir des points de référence. L'évaluation de la classification de l'occupation du sol est mesurée à l'aide d'outils statistiques que sont la matrice de confusion, l'indice de Kappa et les précisions globales. L'indice de Kappa a été utilisé pour apprécier la précision de la classification. L'évaluation quantitative de l'exactitude de la classification nécessite une comparaison des échantillons d'entraînement aux sites de vérité terrain. La qualité des données de terrain conditionne le plus la qualité des produits cartographiques générés par le système. Les ROIs issus de Google Earth (*Figure 2*), servent à estimer la capacité du modèle de classification à reconnaître les différentes classes.



Figure 2 : Collecte de ROIs de validation dans Google Earth

II-7. Méthode d'évaluation de l'érosion hydrique

II-7-1. Données utilisées

La modélisation de l'érosion hydrique nécessite souvent le croisement de plusieurs cartes thématiques appelées facteurs, qui influencent directement ou indirectement l'érosion hydrique des sols. Ainsi, les données utilisées sont composées :

- Du model numérique de terrain SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) téléchargé gratuitement à partir de Earth explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).
- D'une image satellitaire Landsat-8 de 2020 dont les caractéristiques ont été détaillées plus haut.
- Des données pédologiques sur les types de sol en format vectoriel issues de l'institut national de pédologie du Sénégal.

II-7-2. Application de la méthode PAP-CAR (1998)

L'évaluation de l'érosion hydrique est effectuée à l'aide du model PAP-CAR (1998) qui intègre plusieurs facteurs comme la pente, la lithologie, l'érodibilité, l'occupation du sol, la densité du couvert végétal et le degré de protection du sol (**Figure 3**). La carte d'érodibilité est obtenue par superposition de la carte des pentes et de la lithologie tandis que la carte du degré de protection du sol s'obtient par superposition de la carte d'occupation du sol et de la carte de densité du couvert végétal. Le modèle est composé de trois phases :

- La phase prédictive qui aboutit à la réalisation de la carte des états érosifs par croisement de plusieurs facteurs cités plus haut. Cette approche fournit le canevas pour la cartographie du potentiel et des tendances générales d'érosion ;
- La phase descriptive consistant à identifier et évaluer les processus actuels d'érosion sur le terrain, ainsi que les différents degrés d'exposition à l'érosion et les tendances évolutives ;
- L'approche d'intégration c'est la superposition des cartes des états érosifs et la carte des formes d'érosion obtenue par la cartographie descriptive directe des formes d'érosion sur le terrain. Le résultat principal est la carte finale consolidée d'érosion hydrique.

La différence avec le model RUSLE réside dans l'intégration de l'érosivité et de la longueur de la pente. Le traitement des images satellitaires a été effectué sous le logiciel ENVI 5.3 tandis que la superposition de ces facteurs et la cartographie des états érosifs suivant l'approche PAP-CAR et la cartographie de la salinité des eaux et des sols ont été réalisées à l'aide du logiciel ArcGIS 10.8.

III - RÉSULTATS

III-1. Analyse minéralogique des eaux souterraines

La **Figure 3** montre un pH légèrement alcalin au niveau des îles de Bassoul, Dionwar, Djirnda et de Toubacouta. Cependant, on observe une tendance à la baisse du pH au fur et à mesure qu'on se dirige vers le Continent. Ces fortes valeurs du pH sont dues à la remontée du biseau salé. Toutefois, le pH inférieur à 6,5 (modérément acide) domine largement la région et se rencontre dans le Continent. Le gradient de salinité du domaine estuarien vers le continent est lié à la sursalure des eaux marines et à la remontée du biseau salé. Du littoral jusqu'à la limite continentale de la zone d'étude, le pH passe de 8,4 à 4. Ce qui indique que les nappes qui se trouvent en dehors de l'influence des actions hydrodynamiques marines ne sont pas encore contaminées par le sel. La conductivité électrique évolue plus ou moins de la même manière que le pH. La carte de répartition spatiale de la conductivité électrique (**Figure 3**) montre

que les eaux à CE élevée (CE supérieur à 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) caractérisent les puits situés dans les îles de Bassoul et Djirnda ou sous influence des chenaux d'eau salée mettent en évidence l'étendue de la salinité de la nappe. Les valeurs de conductivité comprise entre 4300 et 5900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ se situent dans les îles et aux environs des terres salées et bras de mer. Au niveau du Continent, dans les Communes de Keur Saloum Diané, Keur Samba Guèye, Djilor, Diossong, Niro Alassane Tall et Toubacouta, la répartition spatiale des valeurs de la conductivité électrique est homogène.

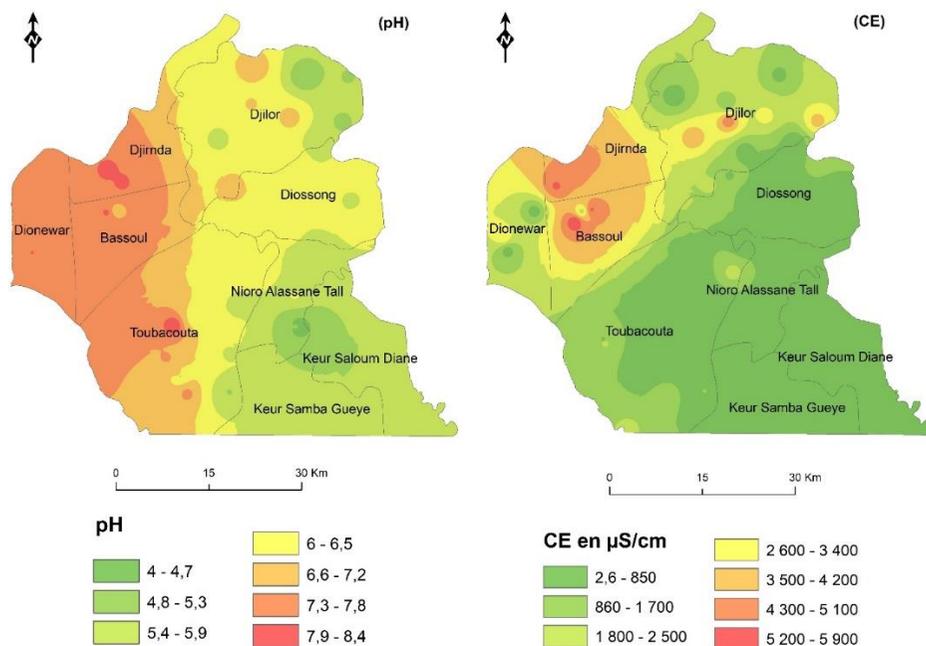


Figure 3 : Répartition spatiale du pH et de la CE des eaux souterraines dans le département de Foundiougne

III-2. Analyse de la salinité des sols

L'analyse du potentiel d'hydrogène et de la conductivité électrique montre le degré de salinité des unités morphologiques dans la région. Le pH (potentiel d'hydrogène) exprime le degré d'acidité ou d'alcalinité du sol. Les sols acides sont localisés dans les communes de Djirnda, Dionewar, Bassoul, Toubacouta et en bordure des chenaux d'eau salée et des cours d'eau (**Figure 4**). Ils sont plus présents dans l'estuaire avec un pH compris entre 3,10 et 5,8. Les sols modérément et légèrement acides (pH compris entre 5,81 et 6,60) sont observés le long des cours d'eau en domaine continental. Les différences de pH des puits de divers sols révèlent une grande variabilité spatiale de la salinité et de l'acidité. Cette répartition spatiale est étroitement liée à la succession des

unités géomorphologiques [9]. L'analyse de la conductivité électrique a mis en évidence quatre classes de sols salés : il s'agit des sols extrêmement salés, des sols très salés, des sols salés et des sols légèrement salés. Les sols extrêmement salés (sols halomorphes salins acidifiés) se caractérisent par une conductivité électrique supérieure à 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces sols se singularisent par une absence totale de végétation à cause de la concentration excessive en sels [3] dans les couches superficielles du sol. Ce sont des tannes vives localisés à la limite des vasières. Les sols très salés se distinguent par une conductivité électrique comprise entre 1000 et 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces sols sont couverts d'une végétation herbacée ou localement arbustive. Ce sont des tannes herbacées. Ces sols sont plus concentrés dans l'estuaire du Saloum notamment dans les communes de Bassoul, Dionwar et Djirnda. Les sols salés et légèrement salés ont une conductivité électrique comprise entre 250 et 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et marquent les limites estuariennes. Ce sont des sols hydromorphes à gley salé et sols halomorphe salins aux limites desquelles commencent les sols ferrugineux tropicaux lessivés.

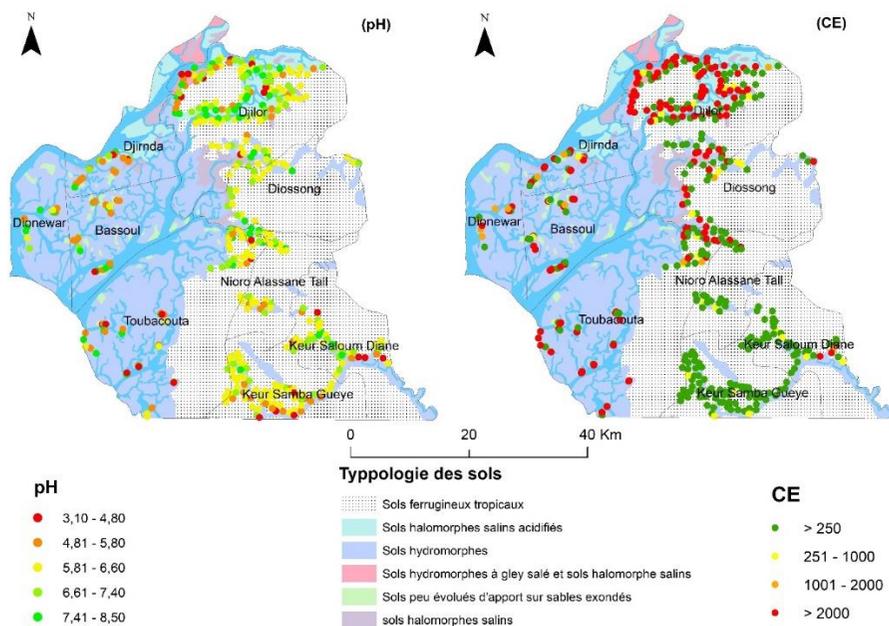


Figure 4 : Répartition spatiale du pH et de la CE des sols dans le département de Foundiougne

III-3. Dynamique de l'occupation du sol

Les résultats de la classification des différentes images sont évalués par une matrice de confusion. À l'absence de vérité terrain pour l'image Landsat TM 1986, une collecte d'échantillons de validation sur la même image de 1986 différemment des échantillons d'apprentissage a été effectuée. L'image

Landsat 2020 a été validée avec les échantillons issus de la plateforme Google Earth. Le résultat de cette démarche nous a fourni une matrice de confusion à partir de laquelle nous avons évalué les performances de la classification. Les précisions globales des classifications donnent des résultats satisfaisants avec 92 % pour 1986 et 93 % pour 2020 et un coefficient Kappa de 90 % pour 1986 et 92 % pour 2020. Pour éliminer les pixels isolés, une opération de lissage a été appliquée. Les classifications ont été validées par des matrices de confusion (**Tableau 4, 5**) qui ont fourni des coefficients Kappa statistiquement acceptables [10].

Tableau 4 : *Matrice de performance de la classification de l'image Landsat TM de 1986*

Classes	Mangrove	Terres salées	Surface d'eau	Végétation continentale	Vasières	Sols peu boisés	Total	Exactitude
Mangrove	80	0	1	0	0	0	81	99 %
Terres salées	0	53	0	0	3	0	56	94 %
Surface d'eau	0	0	56	0	0	0	56	100 %
Végétation continentale	0	0	0	67	0	1	68	99 %
Vasières	0	9	4	0	63	0	76	83 %
Sols peu boisés	0	13	0	0	6	95	114	83 %
Total	80	75	61	67	72	96	451	-
Exhaustivité	100 %	70 %	91 %	100 %	87 %	99 %	-	-
Précisions globales	92 %							
Coefficient de Kappa	90 %							

Tableau 5 : *Matrice de performance de la classification de l'image Landsat-8 OLI de 2020*

Classes	Mangrove	Terres salées	Surface d'eau	Végétation continentale	Vasières	Sols peu boisés	Total	Exactitude
Mangrove	97	0	0	0	0	0	97	100 %
Terres salées	0	71	0	0	16	2	89	80 %
Surface d'eau	0	0	95	0	1	0	96	99 %
Végétation continentale	0	0	0	112	0	0	112	100 %
Vasières	0	0	0	0	51	0	51	100 %
Sols peu boisés	0	17	0	0	0	101	118	85 %
Total	97	88	95	112	68	103	563	-
Exhaustivité	100 %	80 %	100 %	100 %	75 %	98 %	-	-
Précisions globales	93 %							
Coefficient de Kappa	92 %							

III-4. Dynamique de l'occupation du sol et extension des terres salées entre 1986 et 2020

La cartographie de la dynamique de l'occupation du sol dans le département de Foundiougne entre 1986 et 2020 permet d'appréhender l'évolution des terres salées en particulier et les autres entités caractéristiques du milieu. Les statistiques générées à partir des images classifiées (*Figure 5*) mettent en évidence une augmentation des terres salées qui sont passés de 4,97 % (15129,43 ha) en 1986 à 5,97 % en 2020 (18172,94 ha). L'analyse de la *Figure 5* montre la prédominance de la classe sols peu boisés malgré une régression entre 1986 et 2020. Ce qui est important à noter est que les terres salées, ont connu une nette augmentation durant les 35 dernières années. La mangrove et la végétation continentale ont connu une augmentation de leur emprise spatiale en passant respectivement 13,13 % à 17,99 % et 13,37 % à 14,81 % entre 1986 et 2020. Les vasières ont connu une augmentation plus remarquable que les terres salées. Entre 1986 et 2020, elles sont passées de 22261,21 ha (7,32 %) à 33276,91 ha (10,94 %). Les surfaces d'eau ont connu une régression. Elles sont passées respectivement de 30793,1 ha (10,12 %) en 1986 à 28729,54 ha (9,45 %) en 2020. En effet, les grands changements sont plus marqués dans les terres salées, la mangrove, les sols peu boisés et les vasières.

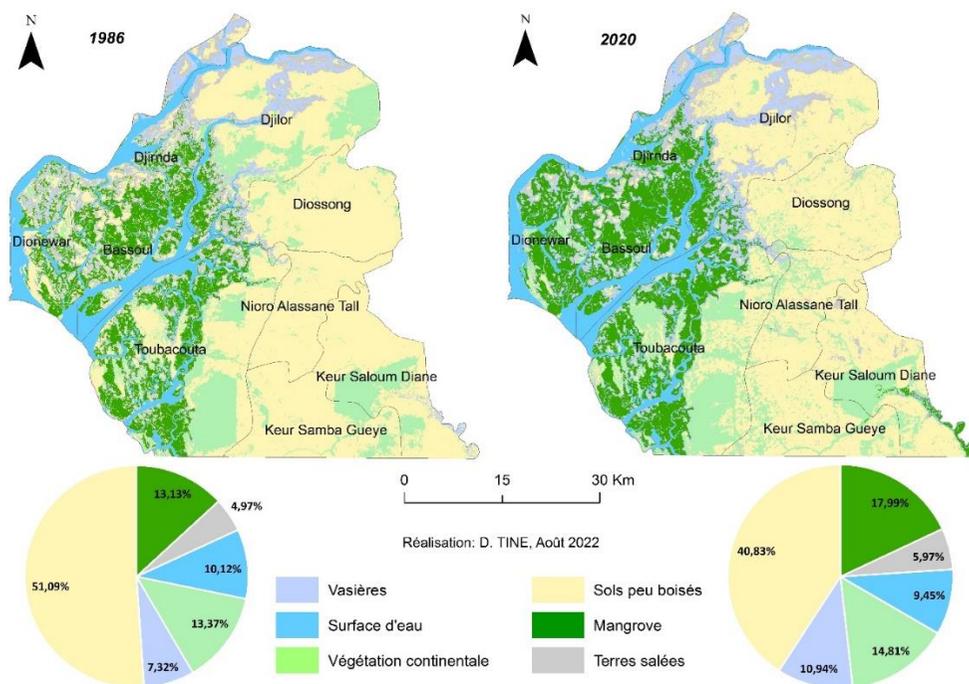


Figure 5 : Occupation du sol dans le département de Foundiougne entre 1986 et 2020

III-5. Évolution du risque d'érosion hydrique des sols

Selon la théorie d'Horton sur l'intensité des pluies, le ruissellement naît quand l'intensité de la pluie dépasse celle de la capacité d'infiltration des horizons superficiels du sol. La capacité d'infiltration du sol décroît au cours des pluies à mesure que la porosité de surface se sature ou se referme (croûte de battance). Il arrive au moment où l'intensité de la pluie dépasse celle de l'infiltration (c'est le temps d'imbibition) : l'excédent s'accumule et circule en filets qui acquièrent une énergie capable d'entailler le sol et de charrier les particules grossières telles que des sables et des graviers. En début d'hivernage, la pluie tombe sur un sol sec avec une énorme capacité d'infiltration (sols ferrugineux tropicaux). Cependant, au fur et à mesure que l'hivernage progresse, le sol se sature et l'infiltration diminue jusqu'au stade où tout ce qui tombe s'écoule : c'est la saturation du substratum. D'après les populations enquêtées, la genèse du ravinement est notée pendant le mois d'août (mois le plus pluvieux). D'après les observations *in situ*, l'érosion hydrique est plus accentuée au sud-ouest du département où les pentes les plus fortes sont observées. Ces pentes empêchent l'infiltration et accroît la vitesse du ruissellement et sa capacité de transport. La **Figure 6** montre un ravinement superficiel caractéristique de la partie sud-ouest de la région.



Figure 6 : Impact du ruissellement sur les terres cultivées à Ndiaye Counda, localité située au Sud de l'espace étudié

III-6. Cartographie de l'érosion hydrique

III-6-1. L'approche prédictive

La superposition des facteurs (**Tableau 6**) qui influencent l'érosion hydrique a abouti à la réalisation de l'approche prédictive. La carte des pentes dérivée du model numérique de terrain est classifiée selon les recommandations du PAP/CAR. Le département de Foundiougne est caractérisé par des pentes

faibles qui occupent 1990,6 km². La lithologie est composée de six (6) types de sols. Les sols hydromorphes à gley salé et les sols halomorphes salins occupent 27,71 km² et sont localisés au nord du département. Ce dernier est dominé par les sols ferrugineux tropicaux qui s'étendent sur 1431,83 km². Les halomorphes salins et halomorphes salins acidifiés sont localisés au bord des chenaux d'eau salée (bolongs) et leurs superficies sont estimées respectivement à 75,61 et 136,94 km². Les sols hydromorphes occupent l'estuaire du Saloum et ses bordures continentales notamment les zones de fluctuation des marées le long des bolongs et sont estimés à 885,48 km². L'érodibilité est fonction de la typologie des sols et de la nature des pentes. Le croisement de ces deux facteurs a mis en évidence le degré d'érodibilité des sols du département de Foundiougne. Les sols halomorphes salins acidifiés et les sols hydromorphes à gley salé et sols halomorphes salins présentent le degré d'érodibilité le plus faible. Ils occupent la partie septentrionale de la région et s'étendent sur 539,45 km². Les zones à érodibilité faible sont majoritaires et concernent les particulièrement les sols ferrugineux tropicaux. Ils occupent une superficie de 1319,61 km² et sont localisés sur la partie nord-est et sud-est du département.

Les hydromorphes sont des sols régulièrement inondés et ce qui leur confère un degré d'érodibilité modéré. Ces sols se retrouvent dans l'estuaire du Saloum et couvrent 605,30 km². Ils sont entrecoupés, par endroits, par des sols peu évolués d'apport sur sables exondés dont l'érodibilité est également modérée. L'occupation des sols est dominée par les terres peu boisées qui occupent 1235,78 km². Les terres salées et les vasières s'étendent respectivement sur 186,27 et 335,35 km². La mangrove occupe le grand espace (544,53 km²) après les terres peu boisées suivie de la végétation continentale (452,62 km²), composée de forêts classées et d'étendues de plantations de manguiers. La faible densité est observée dans les zones de mangrove et de forêts classées qui couvrent une superficie de 1216,11 km². La densité du couvert végétal joue un rôle important dans la protection du sol contre l'érosion hydrique. L'analyse de la carte de protection (**Figure 7**) montre que la partie continentale qui abrite les terres de culture est très faiblement protégée contre l'érosion hydrique. Ces zones exposées s'étendent sur 287,02 km². La protection faible concerne les terres salées nues tandis les sols modérément protégés abritent la végétation continentale plus ou moins dense. Les espaces à forte et très forte protection sont des surfaces d'eau.

Tableau 6 : Classification des paramètres de l'approche prédictive selon PAP/CAR (1998)

Pente		Lithologie	
Inclinaison	Superficie en Km²	Type de sols	Superficie en Km²
Très faible	917,92	Sols hydromorphes à gley salé et sols halomorphes salins	27,71
Faible	1990,60	Sols halomorphes salins	75,61
Modérée	19,55	Sols halomorphes salins acidifiés	136,94
Forte	1,04	Sols ferrugineux tropicaux	1431,83
Très forte	0,02	Sols hydromorphes	885,48
		Sols peu évolués d'apport sur sables exondés	36,14
L'érodibilité		Occupation du sol	
Résistance	Superficie en Km²	Classes	Superficie en Km²
Très faible	539,45	Surface d'eau	287,10
Faible	1319,61	Mangrove	544,53
Modérée	605,30	Végétation continentale	452,62
Forte	32,97	Terres salées	186,27
Très forte	1,72	Vasières	335,35
		Terres peu boisés	1235,78
Densité du couvert végétal	Superficie en Km²	Protection du sol	
Densité	Superficie en Km²	Protection	Superficie en Km²
Très faible	1820,24	Très faible	287,02
Faible	1216,11	Faible	544,60
Moyenne	4,75	Modérée	452,88
		Forte	521,37
		Très forte	1235,24

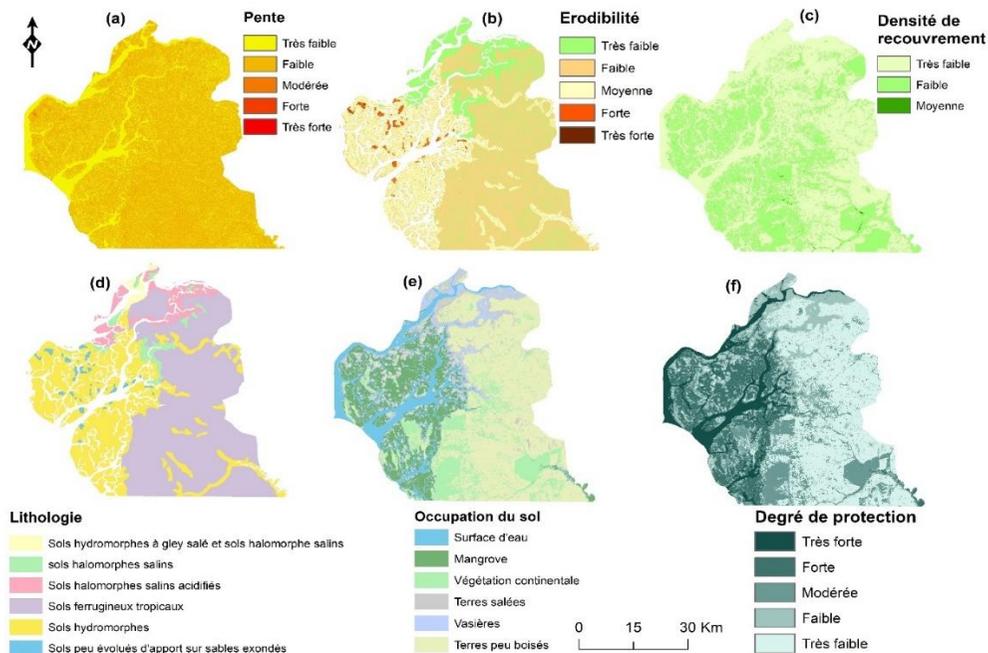


Figure 7 : Facteurs contribuant à la réalisation de la carte des états érosifs

III-6-2. Résultats de l'approche prédictive, descriptive et d'intégration

Le résultat de l'approche prédictive est une carte des états érosifs (**Figure 8a**) qui montre le degré d'érosion des sols du département de Foundiougne. La répartition des superficies sur la carte des états érosifs montre que les classes à risque d'érosion faible et très faible occupent la majorité de la région avec respectivement 27,31 % (68243,4 ha) et 11,29 % (28210,23 ha). Ces espaces sont constitués de mangrove, de vasières et de terres salées localisées dans l'estuaire et à la limite de celui-ci et sur le continent dans les zones fortement couvertes par la végétation continentale. Ce sont des zones à topographie basse, caractérisées par une couverture végétale dense et une érodibilité très faible. Les zones de risque d'érosion élevé s'étendent sur 38, 21 % (95485,59 ha) de la superficie totale du milieu. Elles sont caractérisées par des pentes faibles, parfois modérées, une faible couverture végétale et une lithologie composée essentiellement de sols ferrugineux tropicaux. La carte des états érosifs montre que les sols peu boisés présentent un risque d'érosion forte et parfois très forte. Les zones à risque d'érosion très forte occupent les plus faibles superficies (4,88 % du milieu). Le résultat de l'approche descriptive montre les formes d'érosions (**Figure 8b**) qui existent dans l'espace étudié. L'érosion en nappes ou diffuse, l'érosion en rigoles et le ravinement superficiel sont les plus visibles dans la région. Le résultat de l'approche d'intégration est une carte consolidée de l'érosion (**Figure 8c**), issue de la combinaison des deux étapes précédentes

(prédictive et descriptive). Il s'agit de compléter les résultats obtenus lors de la phase prédictive par les données descriptives des processus d'érosion cartographiés et réalisés au cours de la deuxième phase [11]. L'approche consolidée montre que les zones à risque d'érosion très élevé correspondent aux formes d'érosion en rigoles et ravinements superficiels tandis que les zones à risque d'érosion moyenne ou faible correspondent aux formes d'érosion en nappe et diffuse. Les zones à risque d'érosion très élevé représentent 40 % de la superficie totale de l'espace étudié et sont localisés dans la partie nord-est et sud-est de la région. Cette partie abrite des sols ferrugineux tropicaux parfois lessivés et dépourvus de couverture végétale qui expliquent en partie, cette forme d'érosion observée. Les défrichements faits à l'approche de la saison des pluies parfois avec du feu, laissent le sol dénudé et l'arrivée des premières pluies souvent très agressives entraînent le détachement des particules et un ravinement superficiel. Les zones à risque d'érosion très faibles représentent 13 % de la superficie totale du milieu et correspondent aux endroits où la protection est forte.

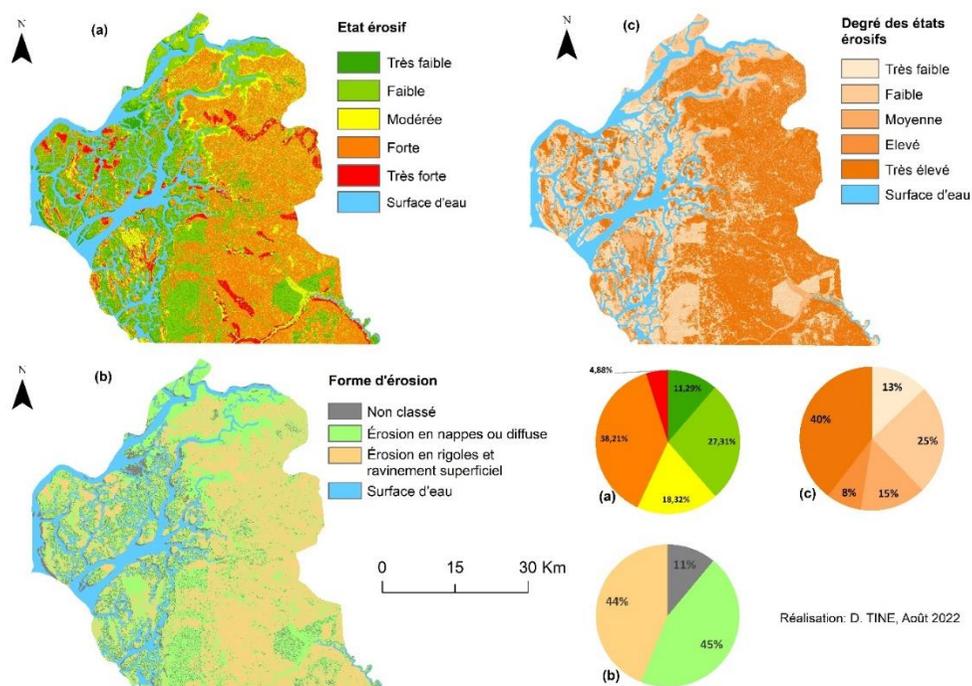


Figure 8 : Carte des états érosifs (a), forme d'érosion (b) et état consolidé d'érosion hydrique (c) dans le département de Foundiougne

IV - DISCUSSION

La salinisation et l'acidification des terres s'accroissent d'une année à l'autre alors que les régions à climat aride à semi-aride restent les plus vulnérables. L'ampleur de la salinité et de l'acidité des sols est liée généralement à la variabilité climatique. Les déficits pluviométriques observés en Afrique de l'Ouest depuis les années 1970, 1980 et 1990, accompagnés par une hausse des températures et une forte évaporation sont à l'origine de l'extension de la superficie des terres salées [12]. Le département de Foundiougne est un milieu fluviomarain marqué par une fluctuation continue des marées, entraînant la remontée de la langue salée vers l'amont des cours d'eau. Ce caractère fait du Sine-Saloum la région la plus affectée par la salinisation des terres au Sénégal. Les processus de salinisation s'effectuent principalement par remontée du biseau salé, le débordement des bolongs en saison pluvieuse et la remontée capillaire des nappes salées. Les fortes températures enregistrées en saison sèche entraînent une évaporation intense qui induit une concentration du sel dans les couches superficielles du sol [3]. Ce processus est accentué par le déficit pluviométrique dont les faibles quantités de précipitations reçues n'entraînent plus le dessalement d'une longue durée d'accumulation de sel [4]. L'analyse des résultats obtenus à partir de l'analyse spatiale de la conductivité électrique et du potentiel d'hydrogène des eaux et des sols montre une forte salinité des eaux souterraines et des sols dans l'estuaire du Saloum. En dehors de celui-ci, les sols situés en bordure des bolongs sont caractérisés par une forte salinité.

Cela est principalement lié aux débordements des eaux salées pendant l'hivernage et lors des marées hautes. Le retrait de ces eaux en saison sèche laisse une effervescence saline en surface qui s'accroît sous l'effet des hautes températures [13]. Les deux paramètres physico-chimiques (pH et CE) montrent des valeurs très fortes dans les communes de Bassoul, Dionwar, Djirnda et de Toubacouta. Leur spatialisation révèle un gradient de salinité et d'acidité de direction Ouest à Est (du littoral vers le continent. Cette forte salinité des eaux souterraines dans les îles est due à la remontée du biseau salé. Les sols acides sont localisés dans les îles et au nord de la région. La salinité des sols est beaucoup plus importante sur les sites situés dans les îles, au niveau des limites estuariennes et en bordure des bolongs au nord. La conductivité électrique est supérieure à 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ce qui indique des sols très salés. Les résultats de l'analyse de la dynamique de l'occupation du sol confirment la tendance à la hausse des superficies des terres salées dans le Sine-Saloum. Entre 1986 et 2020, les terres salées sont passées de 4,97 % (15129,43 ha) en 1986 à 5,97 % en 2020 (18172,94 ha). Cette extension est principalement liée à la variabilité climatique, qui est corrélée à 97 % à la dynamique des terres salées durant ces deux dernières décennies [3]. La salinisation et l'acidification des terres ne sont pas les seuls facteurs de dégradations des terres dans le

département de Foundiougne. L'érosion hydrique constitue une réelle problématique dans la région. L'étude de l'érosion hydrique est réalisée à l'aide du model PAP-CAR (1998). Le résultat permet d'identifier un milieu morphologiquement stable, non affecté par l'érosion et un milieu instable, affecté par l'érosion [14]. La cartographie de l'érosion hydrique a montré que la partie continentale du département de Foundiougne est très vulnérable en raison d'une faible couverture végétale et d'un faciès lithologique meuble et mobilisable par les agents d'érosion. Cependant, bien qu'il existe une bibliométrie autour de cette méthode, elle reste critiquable dans la mesure où elle n'intègre pas le facteur climatique comme l'agressivité des pluies [15].

V - CONCLUSION

La caractérisation de la salinisation, de l'acidification et l'évaluation du risque d'érosion hydrique des sols ont permis d'appréhender leur degré de salinité, d'acidité et de vulnérabilité à l'érosion hydrique. L'analyse spatiale des paramètres physico-chimiques révèle un gradient de salinité (Ouest-est) des eaux souterraines et une forte salinité des sols dans les îles de Bassoul, Dionwar, Djirnda et de Toubacouta avec une conductivité électrique est supérieure à 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les résultats cartographiques de la dynamique de l'occupation du sol ont mis en évidence l'extension des terres salées entre 1986 et 2020 aux dépens des terres peu boisées qui ont régressé de 10,26 % de la superficie totale de l'espace étudié. La mangrove et la végétation continentale ont vu leurs superficies augmenter en passant respectivement 13,13 % à 17,99 % et 13,37 % à 14,81 % entre 1986 et 2020. Les vasières sont passées de 7,32 % à 10,94 % de la superficie totale du département de Foundiougne. La méthode PAP-CAR a montré le caractère vulnérable de la zone d'étude à l'érosion hydrique. En effet, le résultat de l'approche consolidée montre que 40 % de la superficie du milieu présentent un degré d'états érosifs très élevé, ce qui constitue un risque très élevé de dégradation des terres.

RÉFÉRENCES

- [1] - I. M. M. DIA, Élaboration et mise en œuvre d'un plan de gestion intégrée : La Réserve de biosphère du delta du Saloum, Sénégal. Programme Zones Humides et Ressources en Eau - UICN, *SÉRIE BLEUE*, (2003) 145 p.
- [2] - A. SALL, A. TOURÉ, A. KANE, A. NIANG FALL, Contribution à l'étude de la vulnérabilité des terres de cultures de la région de Thiès (Sénégal) à l'aide de la télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG). *Journal of Animal & Plant Sciences*, Vol. 41, (1) (2019). DOI: <https://doi.org/10.35759/JAnmPISci.v41-1.1>
- [3] - B. FAYE, D. TINE, N. DETHIÉ, C. DIOP, G. FAYE, A. NDIAYE, Évolution des terres salées dans le nord de l'estuaire du Saloum (Sénégal). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 25 (2) (2018) 81 - 90 p.
- [4] - 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). *International organization of Scientific Research*, Vol. 10, (4) (2020) 18 - 31 p.
- [5] - M. BARBOUCHI, R. LHISSOU, K. CHOKMANI, R. ABDELFATTAH, A. EL HARTI, N. BEN AISSA, Caractérisation de la salinité des sols à l'aide de l'imagerie radar satellitaire : cas de la Tunisie et du Maroc. Rapport de recherche (R1480). INRS, Centre Eau Terre Environnement, Québec, (2013) 99 p.
- [6] - E. H. B. DIÉYE, T. SANÉ, B. SOLLY, B. D. BA, N. NDOUR, O. SY, M. THIOR, V. MENDY, E. H. S. B. TALL, C. MERING & A.T. DIAW, Dynamique de la mangrove et perceptions locales dans le Département d'Oussouye (Basse-Casamance, Sénégal) entre 1972 et 2018. *Tropicultura*, Vol. 40, (1) (2016) 1 - 27 p.
- [7] - J. H. DURAND, Les Sols irrigables : étude pédologique. Paris : agence de coopération culturelle et technique, 1983 presses universitaires de France, (1983) X - 339 p.
- [8] - G. SORO, E. K. AHOUSSE, E. K. KOUADIO, T. D. SORO, S. OULARE, SALEY, M. B. N. SORO, J. BIEMI, Apport de la télédétection à la cartographie de l'évolution spatio-temporelle de la dynamique de l'occupation du sol dans la région des Lacs (Centre de la Côte d'Ivoire). LSTEE. CURAT, (2014) 15 p.
- [9] - S. NIANG, T. DIOP NIANG, A. T. FAYE, Dégradation chimique des sols dans les systèmes de production du Sénégal : analyse des cas du Haut Saloum, du delta du Sénégal et du Gandiolais. *Revue de Géographie du Laboratoire Leïdi*, N°17 (2017) 246 - 266 p.

- [10] - J. R. LANDIS, G. G. KOCH, The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33 (1977) 159 - 174 p.
- [11] - H. OUSMANA, A. EL HMAIDI, A. ESSAHLAOU, H. BEKRI, A. EL OUALI, Modélisation et cartographie du risque de l'érosion hydrique par l'application des SIG et des directives PAP/CAR. Cas du bassin versant de l'Oued Zgane (Moyen Atlas tabulaire, Maroc). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre*, N° 39 (2017) 103 - 119 p.
- [12] - M. A. TOURE, M. L. NDIAYE, V. B. TRAORE, G. FAYE, B. CISSE, A. NDIAYE, C. T. WADE, Dynamics Analysis and Factors in Landscape Units' Evolution in Senegal River Delta Ecosystems. *Journal of Geography, Environment and Earth Science, International*, 7 (1) (2016) 1 - 12 p. DOI: 10.9734/JGEESI/2016/28000
- [13] - S. SADIO, La connaissance des sols salés sulfatés acides des mangroves : Processus et mécanismes de pédogenèse, distribution spatiale et évolution. In Récupération et valorisation des terres salées en Afrique. Rapport général, Atelier international préparatoire, Académie Nationale des sciences et Techniques du Sénégal, Dakar, Sénégal, (2011) 25 - 26 (non publié)
- [14] - PAP/CAR, Directives pour la cartographie et la mesure des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes. PAP-8/PP/GL.1. Split, Centre d'activités régionales pour le Programme d'actions prioritaires (PAM/PNUE), en collaboration avec la FAO, (1998) XII+72 p.
- [15] - E. AIT YACINE, F. OUDIA, L. NASSIRI, A. ESSAHLAOU, Modélisation et cartographie des risques d'érosion hydrique du sol par l'application des SIG, télédétection et directives PAP/CAR. Cas du bassin versant de Beht, Maroc. *European Scientific Journal*, Vol. 15, N°12 (2019) 259 - 285 p. DOI: <https://doi.org/10.19044/esj.2019.v15n12p259>