

Détection de changement d'occupation du sol et analyse de la dynamique des terres salées dans le Département de Foundiougne (Sénégal).

Dome TINE¹, Mbagnick FAYE², Edmée Mbaye DIOUF³, Ababacar FALL⁴, Bineta FAYE⁵.

¹Département de Géographie, chercheur associé au Laboratoire de Télédétection Appliquée (LTA)- Institut des Sciences de la Terre (IST), Université Cheikh Anta DIOP de Dakar- Sénégal.

² Laboratoire de Climatologie et d'Environnement (LCE)- Département de Géographie, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar- Sénégal.

³ Laboratoire de biogéographie, Département de Géographie, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines.

⁴Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LaSTEE), École polytechnique de Thiès, BP A10 THIÈS, SÉNÉGAL. Chercheur associé à l'EA 7338 PLEIADE, Université Paris 13, 99 avenue Jean Baptiste Clément, 93 430 VILLETANEUSE.

⁵ Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Département de Géographie, Laboratoire de Climatologie et Environnement (LCE).

Résumé

La dynamique des terres salées constitue l'un des problèmes majeurs que rencontre l'agriculture au Sénégal, malgré les nombreux efforts consentis pour la promotion de ce secteur d'activité. La détection des changements d'occupation du sol à partir d'une cartographie précise des unités d'occupation du sol permet d'évaluer et de suivre l'évolution des terres salées. L'analyse des changements des unités morphologiques intervenus au cours de la période étudiée repose sur une cartographie diachronique des modes d'occupation et d'utilisation des sols et de leur répartition.

Notre étude traite de la détection des changements d'occupation du sol dans le Département de Foundiougne. Une approche par classification basée pixel et l'algorithme maximum de vraisemblance ont été retenus. Les données utilisées concernent respectivement les images Landsat TM de 1986, ETM+ de 2000 et OLI de 2015. Les changements ont été détectés par la méthode de comparaison post-classification des résultats des trois images classifiées. Les précisions globales des classifications donnent des résultats satisfaisants avec 92% pour 1986, 90% pour 2000 et 93% pour 2015 et un coefficient Kappa respectif de 90%, 87% et 92%, malgré les confusions entre les classes. Ces résultats ont permis d'identifier l'évolution spatio-temporelle des unités d'occupation du sol et d'analyser les changements. Il ressort de cette étude une augmentation des tannes et une régression considérable des sols nus.

Mots clés : Détection, changement, occupation du sol, dynamique, terres salées.

Abstract

The dynamics of salt lands is one of the major problems facing agriculture in Senegal, despite the many efforts made to promote this sector of activity. Detecting changes in land use from a precise mapping of land use units makes it possible to assess and monitor the evolution of salt lands. The analysis of changes in morphological units that occurred during the period studied is based on a diachronic mapping of land use and use patterns and their distribution.

Our study deals with the detection of land use changes in Foundiougne Department. A pixel-based classification approach and the maximum likelihood algorithm were chosen. The data used relate respectively to the Landsat TM images of 1986, ETM + of 2000 and OLI of 2015. The changes were detected by the method of post-classification comparison of the results of the three classified images. The overall details of the classifications give satisfactory results with 92% for 1986, 90% for 2000 and 93% for 2015 and a respective Kappa coefficient of 90%, 87% and 92%, despite the confusion between the classes. These results made it possible to identify the spatio-temporal evolution of land use units and to analyze the changes. This study shows an increase in tannes and a considerable decline in bare soil.

Keywords: Detection, change, land use, dynamics, salt lands.

I. INTRODUCTION

D'après la FAO, les terres salées affectent au moins 400 millions d'hectares et en menace gravement une surface équivalente¹. Le phénomène de salinisation intense s'est signalé au Sénégal dans les années 1920 suite à la péjoration des conditions climatiques². L'extension des terres salées est due à leur envahissement par les eaux marines lors des marées hautes et qui lorsqu'elles se retirent y déposent des cristaux de sel ; à la remontée capillaire des eaux de nappes phréatiques salées, le mauvais drainage des sols dans les périmètres irrigués et fertilisés par les engrais chimiques et aux vents qui déposent des cristaux de sel sur les sols cultivables situés sur les terrasses hautes des berges. L'évolution des sols du domaine des tannes du Sine Saloum est liée à la sécheresse qu'a connue le Sénégal depuis les années 1970³.

La sécheresse des années 1970 caractérisée par des déficits pluviométriques et un assèchement des terres agricoles, a accentué la dynamique des tannes. Depuis son installation, le Sénégal a connu une dégradation de ses ressources naturelles notamment, dans les régions de Fatick et de Kaolack. Ces phénomènes résultent des changements climatiques dont les effets ont entraîné la remontée du niveau eustatique de la mer et une réduction du drainage des eaux douces par les marigots du Sine Saloum⁴. Le bassin arachidier est l'une des zones les plus touchées par ce phénomène de salinisation au Sénégal. La péjoration du climat, accompagnée d'une succession ininterrompue d'années sèches, explique l'extension remarquable des formations de tannes aux dépens des vasières, notamment dans les parties externes de ces estuaires du Saloum ainsi que la remontée, loin en amont, du front de salinité de certains cours d'eau⁵. La détection de changement par télédétection nous offre plusieurs possibilités d'analyse de l'évolution des entités d'occupation du sol. Elle constitue un vaste champ de recherche qui a fait l'objet d'innombrables publications. Cet état de fait met en évidence le développement des technologies spatiales à échelle mondiale. L'augmentation de la résolution spatiale, la variété des spectres électromagnétiques des capteurs, la diversification de capteurs passifs ou actifs et l'augmentation des zones et des fréquences d'observation offrent de nouvelles possibilités d'applications et nécessitent constamment un renouvellement des méthodes de traitement d'images⁶. C'est grâce à ces avantages technologiques que les processus qui régissent certains de ces changements ayant un impact majeur sur les interactions terre-atmosphère telle que la déforestation dans les milieux tropicaux a été révélés et analysés dans le cadre de programmes internationaux⁷. Le suivi spatio-temporel des ressources naturelles trouvent un moyen d'expression dans la télédétection et les techniques qui leur sont associées. Les données numériques permettent d'envisager à court terme le recours à de nouvelles techniques d'analyse spatiale susceptibles d'apporter de nouveaux éclairages sur leurs dynamiques. L'analyse multi-date, utilisée depuis longtemps pour appréhender les transformations de l'espace, est une démarche qui effectue une étude comparative, par superposition, voire juxtaposition des différents documents traités.

La télédétection est devenue de nos jours, un outil incontournable dans la gestion de l'environnement. Elle offre aux chercheurs une vision globale de l'espace en leur permettant d'y découvrir la distribution des éléments constitutifs. Au vue des problèmes actuels : pression démographique, dynamiques sociales et économiques, changement climatique, transformation des écosystèmes et dégradation de l'environnement, l'information spatiale joue un rôle clef dans les stratégies de développement durable. Ces stratégies reposent sur la compréhension des dynamiques d'occupation de l'espace, l'exploitation des ressources et l'aménagement des territoires⁸. Selon des estimations récentes, les modes d'utilisation des sols qui ont provoqué ces changements sont responsables de la perte d'environ 50% de la productivité primaire nette du globe⁹.

Les changements intervenant dans les modes d'occupation et d'utilisation des sols engendrent des impacts au niveau des processus qui contrôlent les écosystèmes, qu'il s'agisse de conversions, ou de modifications à l'intérieur d'une même catégorie d'occupation ou d'utilisation des sols¹⁰. La détection des changements d'occupation du sol à partir d'une cartographie précise des caractéristiques environnementales permet d'évaluer l'évolution des ressources naturelles. L'analyse de ces changements intervenus au cours des périodes étudiées repose sur une cartographie diachronique des modes d'occupation et d'utilisation des sols ainsi que leur répartition spatiale.

La détection de changement sur une zone géographique donnée, s'applique sur plusieurs images acquises à des dates différentes. La détection des changements est définie comme « la mise en évidence et la localisation des modifications de l'état de surface d'une scène observée à partir de plusieurs images »⁶. L'avancé de la télédétection avec la diversification des capteurs et la finesse de la résolution spatiale a permis aux chercheurs de localiser et d'identifier les changements majeurs ou conversion des terres intervenus au cours des trois derniers siècles, à l'échelle mondiale¹¹. Ces avantages technologiques offrent aux chercheurs la possibilité de développer une multitude de méthodes de détection de changement d'occupation du sol.

Cadre géographique

Le département de Foundiougne est situé dans la région de Fatick entre les latitudes 13°40'30'' et 14°12'00'' Nord et les longitudes 16°49'30'' et 16°07'30'' Ouest (figure 1). Il couvre une superficie de 2 959 km². Il est également composé de 14 Communes et 03 Communes d'arrondissement dont celle de Djilor, Niodior et Toubacouta avec une population totale estimée à 224 659 habitants selon le recensement général de la population et de l'habitat (RGPH) de 2002. La partie insulaire est constituée d'îles couvrant une superficie de 950 km². Cette partie du département appelée îles du Saloum ou îles du Gandoul est située au Nord du Delta du Saloum. La région est caractérisée 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 formée aujourd'hui par un réseau de rias constitué par les trois principaux cours d'eau et une multitude de bolongs dont les apports en eau douce sont presque absents en raison de la variabilité pluviométrique.

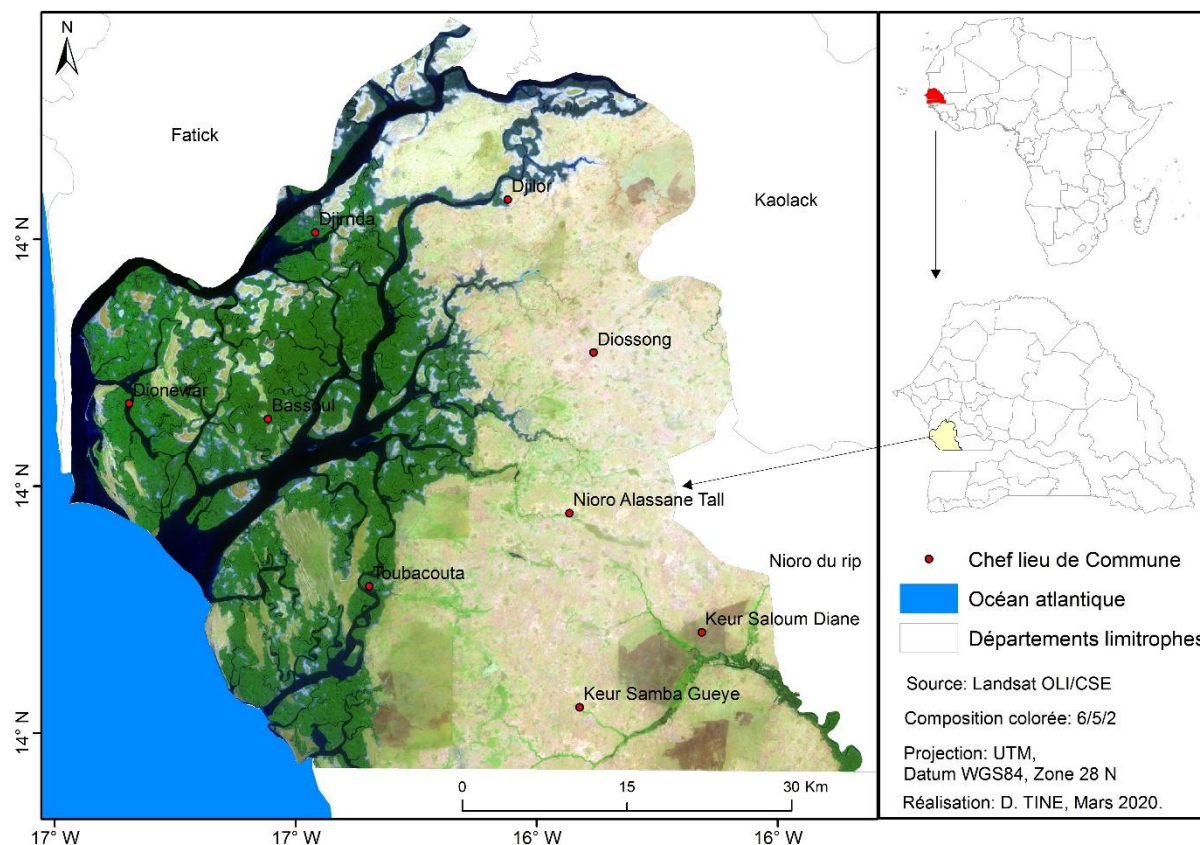


Figure 1: Situation géographique du Département de Foundiougne.

Le climat est de type soudano-sahélien, marqué par l'alternance de flux d'air en fonction des périodes de l'année. Elle est caractérisée par une pluviométrie et une humidité relative assez importante pendant la saison pluvieuse. Les températures et l'insolation varient en fonction des saisons. Le climat de la région est marqué par l'alternance de deux saisons. Une saison non pluvieuse qui dure sept (7) mois de novembre à Mai et une saison pluvieuse qui dure cinq (5) mois de Juin à Octobre. L'évolution moyenne annuelle des précipitations montre des variations très contrastées à l'image de la figure 2.

Cependant, la variabilité pluviométrique tant citée dans la littérature comme l'élément déterminant l'évolution de l'occupation du sol, nous a amené à déterminer le caractère humide ou sec de la saison des pluies en calculant l'indice pluviométrique standardisé (IPS)¹². L'analyse des séries chronologiques des précipitations annuelles révèle l'existence de périodes sèches et humides. L'IPS montre que les variations annuelles des précipitations tournent légèrement en faveur de la sécheresse avec 92% d'années très sèches, 3% d'années extrêmement sèches et 4% d'années extrêmement humides.

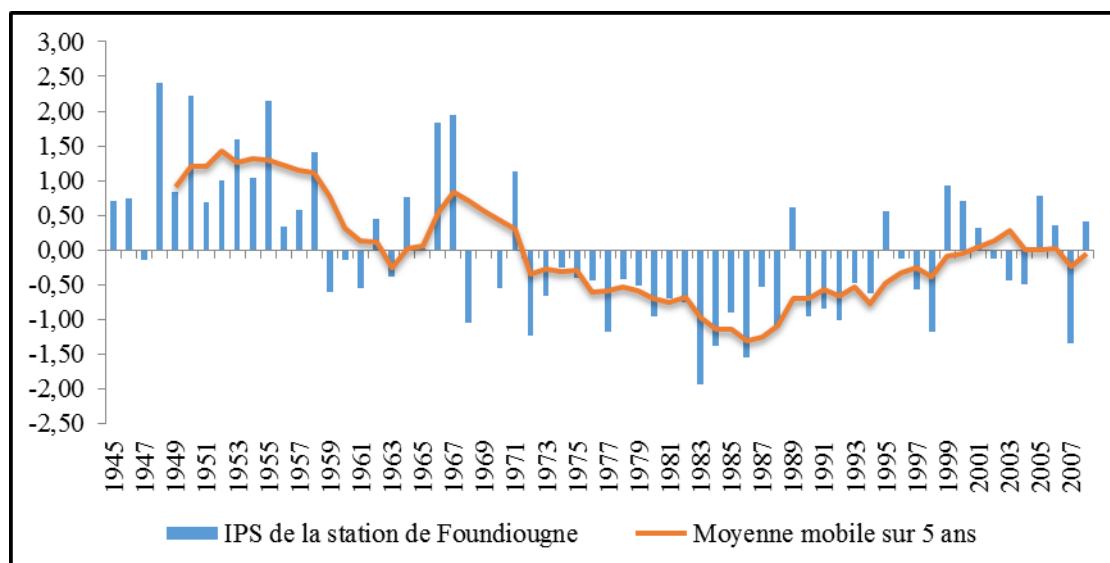


Figure 2: Evolution de l'indice pluviométrique standardisé (IPS) de la station de Foundiougne de 1945 à 2008.

II. MATERIELS ET METHODES

Matériels

Les images Landsat sont retenues pour cette étude. Le choix est basé non seulement sur leur caractère disponible et gratuit mais aussi en fonction de leur ancienneté couvrant une période allant de 1972 à nos jours. Afin d'effectuer une analyse diachronique et déceler les changements d'occupation du sol, il est important de choisir les images satellites couvrant une longue période. Les images sont acquises en saison sèche notamment entre Février et Mars (tableau 1). Une série de correction est appliquée sur ces dernières 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. Le choix des images en saison sèche permet de discriminer le couvert végétal du couvert herbacé. La réflectance de ces deux types de végétation se confond lorsque les images sont acquises en saison pluvieuse ou juste à la fin de celle-ci.

Tableau 1: Caractéristiques des images Landsat utilisées.

Capteurs	Date d'acquisition	Bandes	Longueurs d'ondes	Résolution
TM	09/02/1986	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'ondes	Résolution
ETM+	27/03/2000	1-Bleu	0,45-0,52 μm	30 m
		2-Vert	0,53-0,61 μm	
		3-Rouge	0,63-0,69 μm	
		4-PIR	0,78-0,9 μm	
		5-SWIR 1	1,55-1,75 μm	
		7- SWIR 2	2,09-2,35 μm	
Capteurs	Date d'acquisition	Bandes	Longueurs d'ondes	Résolution
OLI	13/03/2015	2- Bleu	0,450 - 0,515 μm	30 m
		3- Vert	0,525 - 0,600 μm	
		4- Rouge	0,630 - 0,680 μm	
		5- PIR	0,845-0,885 μm	
		6- SWIR 1	1,560 - 1,660 μm	
		7- SWIR 2	2,100 - 2,300 μm	

Méthodes

Pour générer nos cartes d'occupation du sol, nous avons utilisé la méthode de classification supervisée. 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 sol¹³. La classification par maximum de vraisemblance est basée sur la règle de Bayes :

$$Pr\{A_i|B\} = \frac{Pr\{A_i\} \cdot Pr\{B|A_i\}}{\sum Pr\{A_i\} \cdot Pr\{B|A_i\}}$$

(Source : <http://www.seos-project.eu>)

Où A_i représente la classe i , B représente les valeurs de réponse du pixel.

$Pr\{A_i|B\}$ est la probabilité conditionnelle que la classe A_i soit la classe où placer le pixel B .

La détection des changements d'occupation du sol exige un certain nombre de critères que l'utilisateur doit prendre en compte afin de minimiser les erreurs dans les classifications et la détection des changements. Parmi ces critères nous pouvons citer les corrections radiométriques et atmosphériques des images, date de prise de vue similaire et la normalisation des images. Cette dernière consiste à utiliser une image comme référence sur laquelle on ajuste les propriétés radiométriques de l'image à corriger pour que les effets indésirables de différentes conditions d'acquisitions de prise de vue puissent être minimisés ou éliminés¹⁴. Cette technique permet de comparer, en termes de caractéristiques radiométriques, les images obtenues par différents capteurs et en différentes dates. Le logiciel ENVI 5.3 nous a permis de normaliser les images tout en fixant l'image Landsat ETM+ acquise en 2000 comme référence.

La littérature a montré que parmi les nombreuses méthodes de détection de changements, la comparaison post-classification est la plus utilisée. C'est la méthode la plus évidente qui nécessite la comparaison d'images classifiées produites indépendamment. Elle nous a permis d'appréhender les modifications survenues au cours de l'intervalle de temps considéré et de cartographier les changements d'occupation du sol dans la région étudiée. La comparaison post-classification est prometteuse parce que les données des deux dates sont séparées, classifiées, minimisant ainsi le problème de la normalisation de la pression atmosphérique et de différence de capteur entre deux dates¹⁵. La figure 3 illustre les différentes étapes de traitement effectuées dans ce travail.

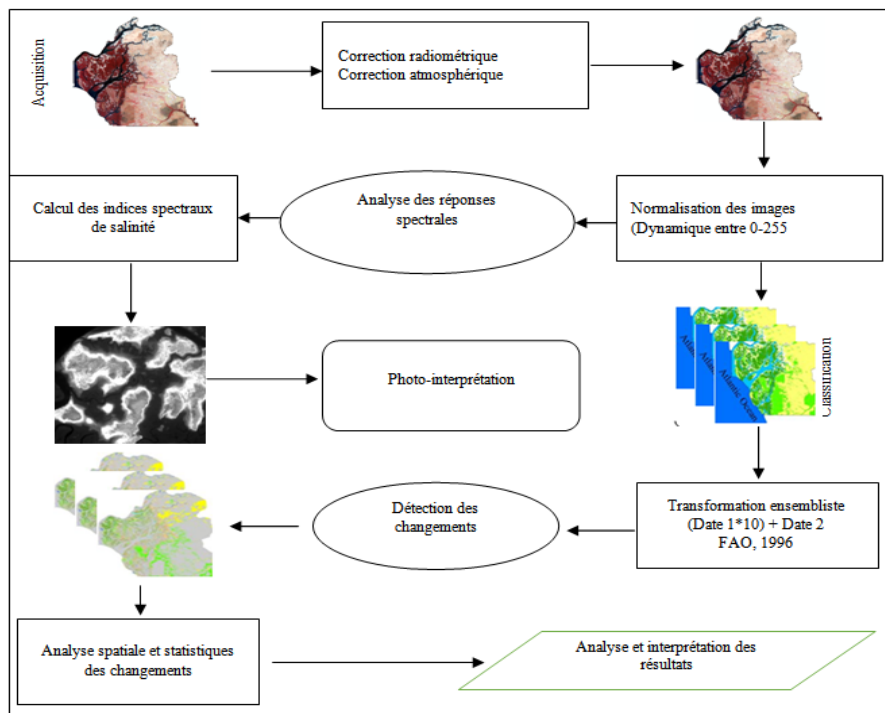


Figure 3: Organigramme méthodologique de traitement des images.

Les compositions colorées

Partant du principe selon lequel il existe des parties du spectre électromagnétique, en dehors du visible, qui enregistrent des informations qui ne sont pas décelables à l'œil nu, nous avons affecté aux bandes spectrales du système d'observation, des couleurs d'affichage (RGB), qui ne leur correspondent pas. Cette combinaison associe trois bandes de l'image multispectrale aux couleurs rouge, verte et bleue de l'écran. Une composition colorée fausse couleur infrarouge (figure 4), fréquemment désignée comme standard quand il s'agit des images Landsat, a été testée en premier temps. Réputée comme étant très efficace pour mettre en évidence le couvert végétal, elle exploite la particularité du spectre réfléchi par les végétaux, qui présente un "pic" important dans le proche infrarouge. Sur une image en "fausses couleurs infrarouge", la végétation qui a une forte activité photosynthétique apparaît en rouge. Cependant, nous avons remarqué que cette composition colorée est très adaptée à l'identification des terres salées vives, marquées par une effervescence saline en surface. Pour détecter les terres salées dans le domaine spectral du visible, proche et moyen infrarouge, il faut que les sels précipitent en surface¹⁶.

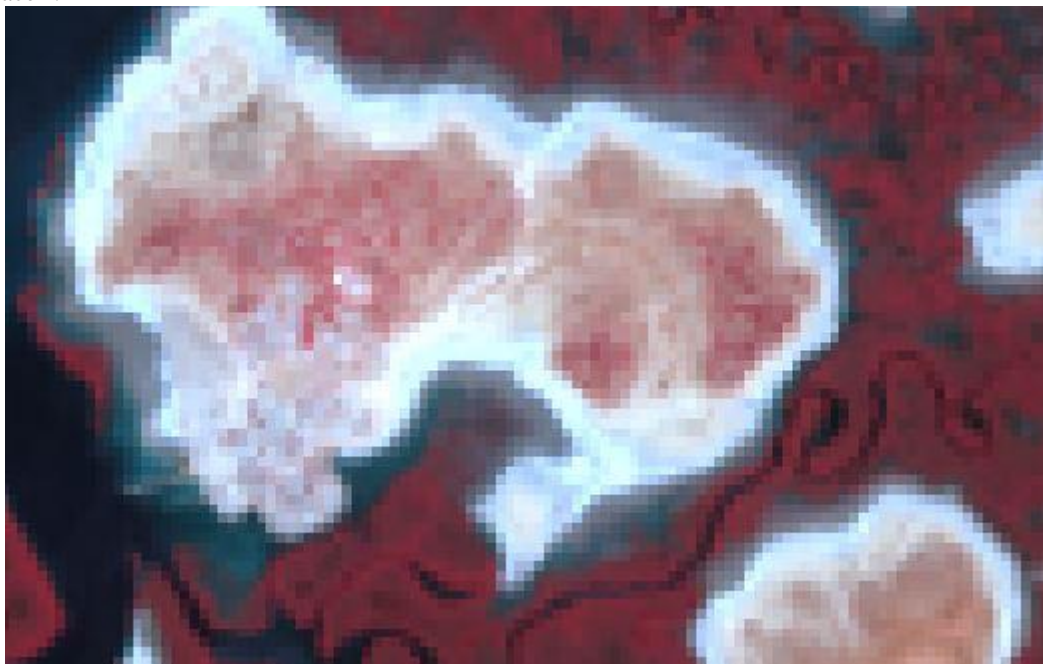


Figure 4: Composition colorée fausse couleur infrarouge (5/4/3) de l'image landsat 8 mettant en évidence les terres salées vives (en blanc).

Les indices spectraux de salinité

Nombreux sont les indices spectraux qui mettent en évidence les sols salés. Dans cette étude, nous avons testé un certain nombre d'indices afin d'identifier les terres salées. La problématique de la salinité et de la salinisation des sols est un réel danger pour la sécurité alimentaire dans le Sine Saloum en général. La superficie des terres arables est en perpétuelle réduction de même que les rendements agricoles. Cependant la teneur en sel varie d'un endroit à un autre. Les tannes vifs sont localisés le long des bolongs où on peut noter une effervescence saline en surface notamment en saison non pluvieuse marquée par de fortes températures et une forte évaporation. Cette forte teneur en sel diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne des cours d'eau. Une végétation halophile commence à peupler les espaces salés qui restent par ailleurs impraticables à l'agriculture. Ce couvert végétal herbacé est à l'origine des problèmes de quantification des terres salées par télédétection. Il modifie fortement le signal et entraîne des confusions avec d'autres entités d'occupation du sol. Le calcul des indices spectraux suivi d'un seuillage basé sur la valeur minimale de réflectance du sol salé va permettre de mettre en évidence les espaces salés bien que leur signal soit influencé par d'autres facteurs.

L'indice de salinité (SI) met en évidence les étendues de terres salées. Il est défini par la combinaison des bandes du visible des images Landsat TM, ETM+ et OLI. Il est appliqué également pour discriminer les niveaux de salinité des sols. Il est établi en multipliant la bande 2 (vert) par la bande 3 (rouge) et le tout divisé par la bande 1 (bleu).

$$SI = \frac{B2 * B3}{B1}$$

III. RESULTATS

Les statistiques tirées des cartes d'occupation du sol de 1986, 2000 et 2015 (figure 5) mettent en évidence la dynamique spatio-temporelle de chaque classe thématique (tableau 2). En 1986, on note la prédominance des sols nus. Ils représentent 151589,07 ha soit 49,84% de la superficie de zone d'étude. Les terres salées sont estimées à 15131,25 ha (4,97%) tandis que l'eau représente 10,4% d'où la forte densité du réseau hydrographique. Les vasières dont leur étendue dépendant des saisons et des apports en amont de l'estuaire occupent 7,16% de la superficie de notre site d'étude. Les forêts occupent quant à elles 13% soit 39544,11 hectares. La mangrove, une végétation halophile, qu'on retrouve un peu partout dans l'estuaire du Saloum, s'étend sur une superficie de 44491,5 ha, soit 14,63% de l'espace total du milieu d'étude en 1986.

En 2000, les sols nus couvrent 43,63% (132697,62 ha) de l'espace Départemental. Nous signalons que le bâti est très faiblement répandu dans la région au point de se confondre avec la classe sols nus, raison pour laquelle nous les avons assemblés. Le site d'étude est une zone quasiment rurale où l'activité agricole domine largement. Ce qui justifie cette étendue de sols nus qu'on peut considérer par ailleurs comme des terres de culture. Cependant, on note une légère augmentation des terres salées (tannes), qui passent de 4,97% en 1986 à 5,11% en 2000. La mangrove occupe 16,87% (51323,49 ha), 9,32% (28335,42 ha) pour l'eau. Les forêts couvrent une superficie de 43372,35 hectares tandis que les vasières représentent 10,81% (32886,54 ha) de la superficie totale.

L'état de l'occupation du sol en 2015 montre une avancée importante des terres salées entre 2000 et 2015. Cette extension peut être liée à la variabilité climatique observée à travers l'IPS. Les tannes sont passés de 5,11% en 2000 à 10,41% (31671,18 ha) de la superficie totale en 2015 soit le double de l'année 2000. La mangrove est quasiment stable avec 16,45% (50044,68 ha) de la superficie du Département. La classe eau connaît une légère augmentation avec 30610,35 ha soit 10,06% de la superficie totale. Les forêts, majoritairement composées de forêts classées, s'étendent sur une superficie de 56058,12 ha (18,43 %) tandis que les vasières, représentent 2,59% (7884,9 ha), de la superficie de notre zone d'étude.

Tableau 2: Statistiques de l'occupation du sol entre 1986, 2000 et 2015.

Classes	1986		2000		2015	
	Superficie (ha)	Proportion (%)	Superficie (ha)	Proportion (%)	Superficie (ha)	Proportion (%)
Mangrove	44491,5	14,63	51323,49	16,87	50044,68	16,45
Tannes	15131,25	4,97	15544,53	5,11	31671,18	10,41
Eau	31623,84	10,4	28335,42	9,32	30610,35	10,06
Forêts	39544,11	13	43372,35	14,26	56058,12	18,43
Vasières	21780,18	7,16	32886,54	10,81	7884,9	2,59
Sols nus	151589,07	49,84	132697,62	43,63	127890,72	42,05

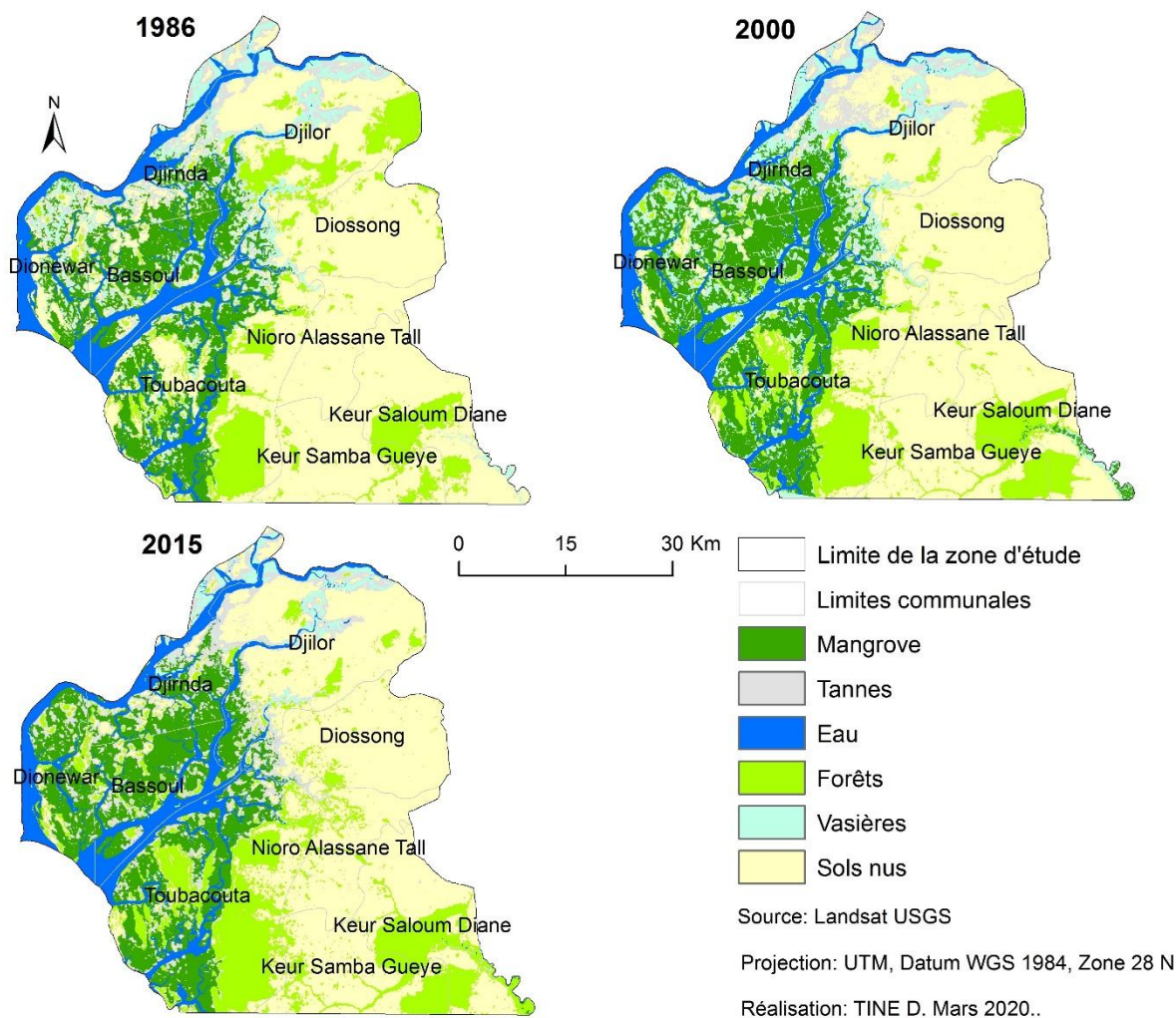


Figure 5: Occupation du sol du Département de Foundiougne en 1986, 2000 et 2015.

La cartographie de l'occupation du sol du Département de Foundiougne de 1986, 2000 et 2015 permet d'appréhender la dynamique spatio-temporelle des terres salées en particulier et les unités d'occupation du sol en général. Les statistiques générées à partir des images classifiées mettent en évidence une avancée des tannes qui sont passés de 4,97% (15131,25 ha) en 1986 à 10,41% en 2015 (31671,18 ha). L'évolution des différentes unités paysagères est présentée dans la figure 6. L'analyse de cette figure montre la prédominance de la classe sols nus malgré une régression par rapport à l'année 1986. Ce qui est important à noter est que les terres salées, ont connu une nette augmentation ces 15 dernières années. Dans cette partie des Rivières du Sud, le climat est le seul facteur qui contrôle la dynamique de l'occupation du sol. L'évolution du milieu physique est liée à la fluctuation des conditions climatiques.

L'avancée des tannes impacte sur les activités agricoles en réduisant les superficies cultivables. Les classes mangrove et eau ont moins évolué tandis que les vasières ont connu un recul considérable. La classe forêts, composée de forêts classées et d'aires marines protégées, passe de 39544,11 ha en 1986 à 56058,12 ha 2015, soit une augmentation de 5,43 %.

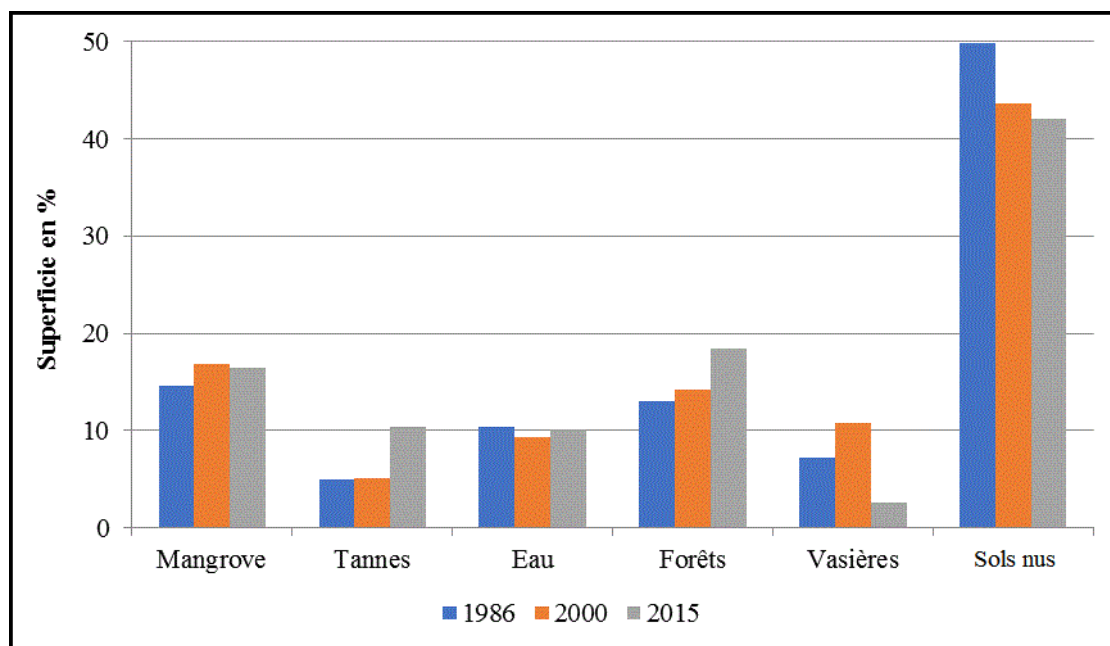


Figure 6: Superficie en (%) des classes d'occupation du sol en 1986, 2000 et 2015.

Analyse de la réflectance des terres salées

La réflectance des unités géomorphologiques dépend de leurs caractéristiques intrinsèques ainsi de leur état de surface. L'humidité, la rugosité et d'autres éléments qui varient en fonction du temps influent sur la réflectance des entités d'occupation du sol. En milieu littoral, les difficultés souvent notées dans l'évaluation des unités géomorphologiques sont liées aux confusions dues au mélange de signal réfléchi, à la résolution spatiale et radiométrique. Ces problèmes sont surtout notés sur les terres salées, les vasières à mangrove et les terres de culture.

L'estimation et la cartographie des terres salées constituent un réel problème lié à leur typologie (figure 7), à leur degré de salinité à leur réflectance. Les terres salées réfléchissent différemment en fonction des saisons et des états de surface. En saison sèche, sous l'effet de la forte évaporation, le sel a tendance à se concentrer au niveau des couches superficielles du sol. En fonction de leur degré de salinité, certains sols salés sont couverts généralement de végétation herbacée ou arbustive qui fait que leur signal se mélange avec celui de cette matière organique en surface et se confondent aux terres de culture sur les images acquises en saison sèche. Seuls les sols salés nus, appelés communément tannes vifs, sont identifiables dans les domaines spectraux du visible et du proche infrarouge. La cartographie des tannes vifs par télédétection ne pose pas de difficultés. En revanche les sols à horizon sodique, les sols peu salés ou en voie de salinisation sans manifestations spécifiques de surface, sont mal identifiés et les surfaces sous-estimées¹⁶.

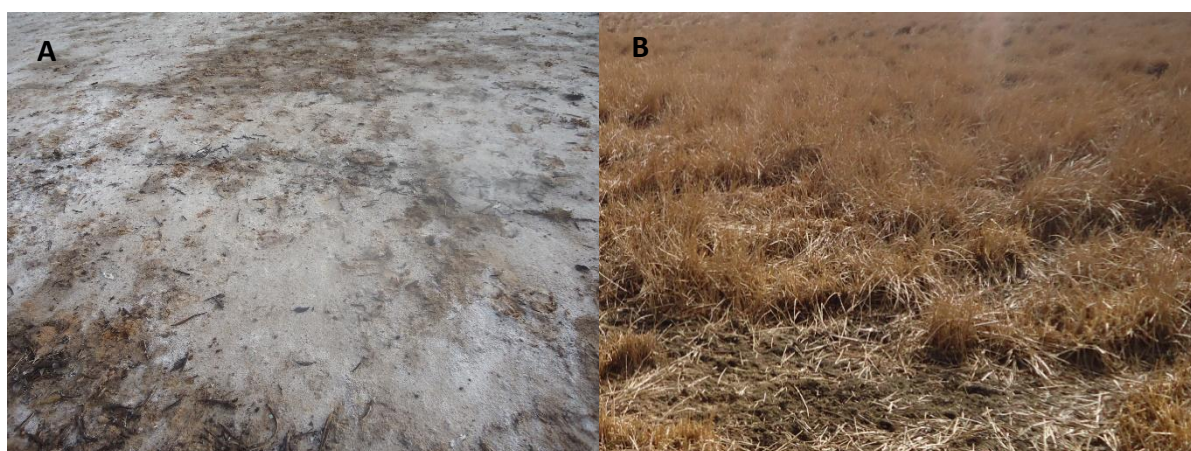


Figure 7: Terres salées vives (A) et herbacées (B) justifiant la problématique liée à leur estimation par télédétection.

La figure 8 montre que l'eau contenue dans les sels réfléchit les petites longueurs d'ondes du bleu et est à l'origine des pics d'absorptions constatés au niveau des longueurs d'ondes du vert et du proche infrarouge. L'allure des signatures spectrales des tannes herbacés et des terres de culture confirme les confusions notées dans les classifications. Ces deux courbes se confondent presque dans le domaine du visible. La teneur en eau des vasières leur confère une signature spectrale identique à celle de l'eau. La différenciation de ces unités d'occupation du sol se trouve dans l'infrarouge petite longueur d'ondes (SWIR 1) où les tannes vifs, les tannes herbacés et les terres de culture réfléchissent fortement.

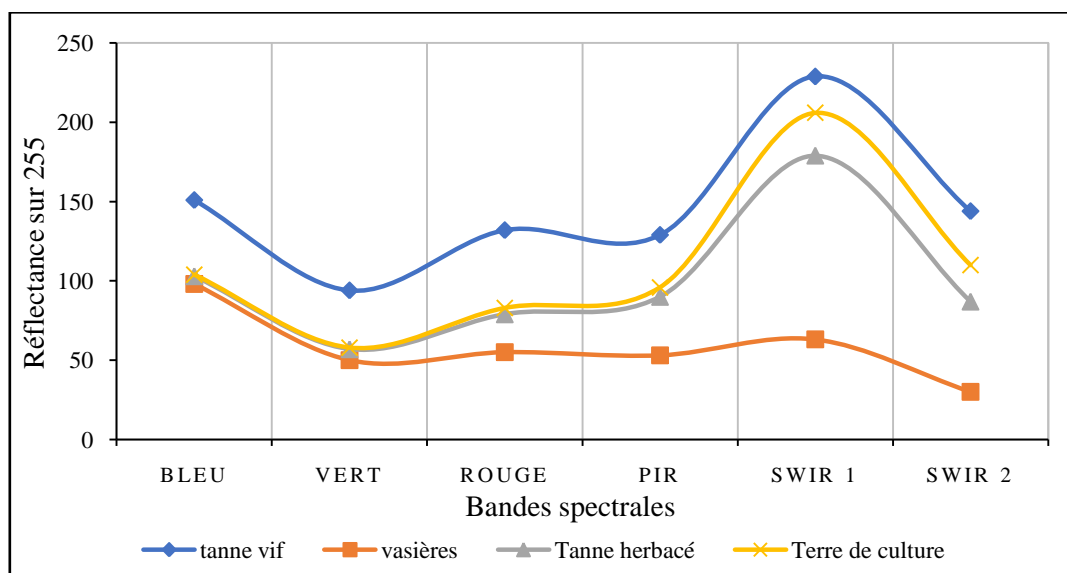


Figure 8: Réflectance des tannes vifs, tannes herbacés, vasières et terres de culture dans le domaine du visible et du proche infrarouge.

Détection des changements d'occupation du sol

Le paysage du Département de Foundiougne a connu des changements souvent liés au processus de salinisation et les paysages du système hydrologique du Delta. Les marées et la submersion régulière des zones basses que sont les tannes influencent le régime hydrologique. Ce dernier est l'un des types d'apport de sel les plus remarquables. La circulation des eaux dans un réseau hydrographique très dense et alimenté par les eaux hypersalées de la mer, le faible apport d'eaux douces, la hausse de températures et de l'évaporation et dans une moindre mesure la remontée capillaire des nappes salées, constituent un système dynamique qui engendre les changements (modification ou conversion) des unités d'occupation du sol.

Les cartes d'occupation du sol sont croisées deux à deux pour générer des cartes de changement (figure 9) et une matrice qui traduit l'évolution des différentes classes thématiques entre ces deux dates. Pour détecter les changements survenus entre deux dates et permettre une visualisation des zones ayant évolué, nous avons procédé à un recodage des différents thèmes sur les classifications. L'analyse des changements repose sur trois niveaux. Il s'agit des modifications, des conversions et des situations sans changement. Par modification, il faut comprendre les changements intervenus à l'intérieur d'une même catégorie d'occupation du sol comme par exemple vasière qui devient tannes ou vice versa¹⁷. Tandis que la conversion est le passage d'une catégorie d'occupation du sol à une autre. Les zones sans changement concernent l'ensemble des classes qui sont restées stables entre deux dates.

La cartographie de l'occupation du sol ne renseigne pas sur la nature des changements ainsi que leurs superficies. L'intégration des informations à la base de données d'un SIG permet d'obtenir assez facilement certaines statistiques ainsi qu'une forme de cartographie de l'évolution de l'occupation du sol. La qualité des résultats dépend de la précision de chacune des classifications et de la superposition des images¹⁸. Les limites de cette méthode sont liées parfois à son caractère sur-estimatif des changements d'occupation du sol. Certaines erreurs liées à la classification d'une ou de plusieurs images altèrent la précision des statistiques des changements.

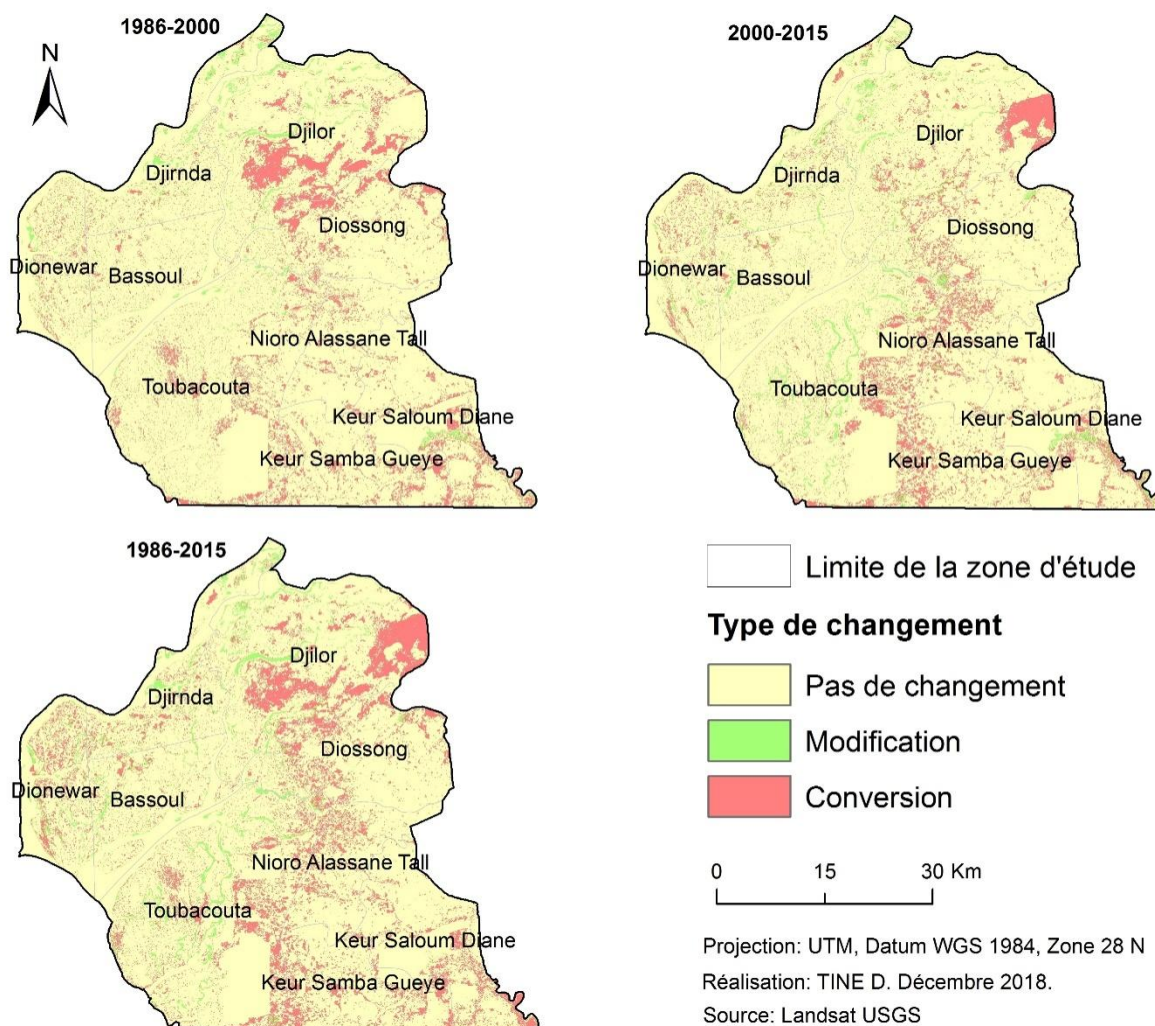


Figure 9: Changements globaux des unités d'occupation du sol entre 1986-2000, 2000-2015 et 1986-2015.

L'analyse, l'interprétation et la présentation des résultats issus de la comparaison post-classificatoire deux à deux des trois images sont effectuées dans chaque intervalle de temps traité. Les trois matrices de changements exprimées en pourcentage (tableau 3, 4, 5), résultent d'un croisement deux à deux des cartes d'occupation du sol. L'analyse du tableau 3 montre les changements opérés pour chaque unité spatiale entre 1986 et 2000. La classe la plus stable est la mangrove qui a gardé 98,55% de sa superficie. Les deux matrices mettent en exergue les changements affectant plus les sols nus. Ils n'ont gardé que 34,76% de leur superficie initiale. Le changement le plus marquant concerne les terres de cultures, convertis vers d'autres entités d'occupation du sol à hauteur de 56,67% soit 197008,38 ha. Les vasières sont des étendues de sédiments meubles (vases) déposés sur les rivages marins, les estuaires ou les deltas et découvertes à marée basse. Elles sont soumises au flux et au reflux de la mer et plus ou moins recouvertes d'eau selon l'amplitude des marées. Elles sont de conditions d'extrême salinité que certaines plantes sont incapables de supporter. Le retrait des eaux salées entraîne la concentration du sel en surface et la formation des tannes. Cela justifie les 5054,85 hectares (33,31%) de terres salées qui se sont modifiées en vasières et les 176,4 hectares de vasières qui sont passées en tannes. Le changement entre ces deux unités d'occupation du sol dépend des conditions climatiques et de l'intensité des marées. Les classes eau et forêts n'ont pas subi de grands changements vu que chacune d'elle connaît respectivement une stabilité à hauteur de 88,49% et de 72,22%.

À la lecture du tableau 4, nous avons remarqué une forte conversion des vasières en tannes à hauteur de 93,85% soit 210868,47 ha. La superficie de la mangrove est stable à 92,65% tandis que l'eau détient la plus grande stabilité avec 98,46% de sa superficie totale. La classe sols nus quant à elle, n'a pas subi de grands changements. En ce qui concerne les terres salées, 41,93% de leur superficie se sont convertis en sols nus. Compte tenu de la nature des tannes et de leur caractère inapte à l'agriculture, ces conversions peuvent être dues à un problème de confusion, lié aux capteurs, entre les deux classes. Les terres salées qui ne sont pas envahies périodiquement par les eaux de mer ou des bolongs ont tendance à ressembler aux sols nus du point de vue de leur réflectance. Elles sont mises en évidence par une composition colorée fausses couleurs 4-3-2.

Détection de changement d'occupation du sol et analyse de la dynamique des terres salées dans le ..

L'analyse de la matrice de changement (tableau 5) générée à partir des cartes d'occupation du sol de 1986 et 2015, nous révèle que la classe la plus évoluée reste les vasières avec un taux de changement de 72,61% (16155,99 ha) de sa superficie initiale. La matrice nous montre également que 49,91% (11106,09 ha) de la superficie totale des vasières s'est convertis en tannes et 11,59% en mangrove. La classe sols nus suit avec un changement de 67,35% dont 57,18% sont convertis en terres salées. Nous avons remarqué que la classe mangrove est la plus stable à 97,28% de sa superficie totale, suivi de la classe eau avec 93,37% et des tannes avec 80,08%. Ce qui est important à noter dans cette période est que 15,50% soit 2352,15 ha des sols nus sont convertis en terres salées. D'où la problématique de dégradation des sols par salinisation dans la région. Comme nous pouvons le constater, la matrice (tableau 5) met en évidence l'importante régression des sols nus à 67,34% de sa superficie sur une période de 30 ans.

Tableau 3 : Matrice de changement de l'occupation du sol (en %) entre 1986 et 2000.

		1986					
2000	Classes occupation du sol	Mangrove	Tannes	Eau	Forêt	Vasières	Sols nus
	Mangrove	98,55	0,14	0,02	0,13	9,21	2,97
	Tannes	0,01	63,17	0,16	0,20	0,79	1,63
	Eau	0,04	0,00	88,49	0,00	4,94	0,01
	Forêts	0,15	0,03	0,00	72,22	0,01	3,97
	Vasières	1,17	33,31	11,31	0,43	83,19	56,67
	Sols nus	0,08	3,34	0,02	27,01	1,86	34,76
	Class Total	100	100	100	100	100	100

Tableau 4: Matrice de changement de l'occupation du sol (en %) entre 2000 et 2015.

		2000					
2015	Classes occupation du sol	Mangrove	Tannes	Eau	Forêt	Vasières	Sols nus
	Mangrove	92,65	0,02	0	0,12	0,99	0,17
	Tannes	3,96	56,71	0,2	0,32	93,85	1,14
	Eau	0,1	0,34	98,46	0,01	1,15	0,02
	Forêts	3,19	0,88	0,02	84,14	0,58	12,44
	Vasières	0	0,13	1,27	0,02	3,34	0
	Sols nus	0,11	41,93	0,05	15,39	0,1	86,23
	Class Total	100	100	100	100	100	100

Tableau 5: Matrice de changement de l'occupation du sol (en %) entre 1986 et 2015.

		1986					
2015	Classes occupation du sol	Mangrove	Tannes	Eau	Forêt	Vasières	Sols nus
	Mangrove	97,28	0,57	0,07	0	11,59	2,58
	Tannes	1,48	80,08	2,36	0,19	49,91	57,18
	Eau	0,17	0,03	93,37	0,01	7,31	0,06
	Forêts	1,01	1,19	0,05	70,48	3,23	7,47
	Vasières	0,03	2,63	4,03	0	27,39	0,05
	Sols nus	0,04	15,5	0,13	29,31	0,58	32,66
	Class Total	100	100	100	100	100	100

IV. DISCUSSION

La cartographie de l'occupation du sol à partir des images satellites ne peut pas représenter d'une manière parfaite, la réalité du terrain. Ce procédé est toujours influencé par certaines erreurs souvent liées aux capteurs, aux producteurs, à l'utilisateur et à la précision du GPS dans la collecte de vérité terrain.

Cette étude de détection des changements d'occupation du sol et d'analyse de la dynamique des terres salées que nous venons de réaliser décèle les tendances évolutives des terres salées dans le Département de Foundiougne. Ce document, bien que limité dans la mesure où la validation des classifications pour les images Landsat TM 1986 et ETM+ 2000, n'a pas été faite par des données de réalité terrain, constitue une source d'information pour une gestion durable des ressources naturelles dans la région.

Du reste, les résultats d'une analyse d'image dont la valeur de Kappa est supérieure à 0,50 sont bons et exploitables¹³. Cependant, les classifications sont jugées acceptables et permettent d'évaluer les changements d'occupation du sol de 1986 à 2015 soit une période de 30 ans. Les erreurs de confusion sont notées au niveau des classes tannes, vasières et sols nus. La difficulté à discriminer visuellement ces classes peut être due à des signatures spectrales similaires, vu que les vasières sont des terres salées constamment inondées. La confusion entre terres salées et sols nus réside dans le fait que les tannes dépourvus de concentration de sel en surface et parfois herbus sont inséparables du point de vue observation visuelle.

Les résultats montrent une tendance à la croissance des terres salées. Les changements ont été analysés par classification dirigée et comparaison post-classificatoire qui ont donné des statistiques permettant de les apprécier. L'approche de la méthode de comparaison des classifications a témoigné l'utilité d'une approche simple pour détecter des changements de l'occupation du sol et la facilité à créer des cartes des changements¹⁹. Les précisions globales des classifications donnent des résultats satisfaisants avec une précision de 92% pour 1986, 90% pour 2000 et 93% pour 2015.

Cependant, la qualité des résultats peut être améliorée en travaillant avec des images de haute résolution spatiale tout en validant les classifications avec une vérité terrain. Les matrices de transition, qui analysent le passage d'une classe d'occupation du sol à une autre, montrent que les classes les plus affectées par les changements concernent les tannes qui présentent une importante progression sur toute la série avec un taux de 109,31% entre 1986 et 2015. Une légère progression des classes mangrove et forêts de l'ordre de 12,48% et 41,76% a été également enregistrée. Contrairement aux classes tannes et mangrove, les vasières ont connu une importante régression de -63,8% au profit des terres salées.

Nombreux sont les études qui ont été menées dans la région mais à cause de la méconnaissance et le développement tardive des outils de télédétection spatiale au Sénégal en général, la surveillance des ressources naturelles dans le temps et dans l'espace était limitée. Ainsi se pose le problème d'estimation des superficies des différentes unités d'occupation du sol. Les changements climatiques longtemps évoqués par les chercheurs, bien qu'ils soient une réalité n'ont pas pour l'instant eu d'impacts négatifs sur le couvert végétal de mangrove. Les changements notés dans l'occupation du sol notamment sur les tannes sont dus à la variabilité climatique.

Après analyse et interprétation des résultats obtenus, nous avons constaté que les causes de ces changements sont d'ordres climatiques, topographiques, hydrologiques et océanographiques. L'étude de la variabilité climatique a bien mis en évidence le déficit pluviométrique tant cité par les chercheurs dans la région du Sine Saloum.

V. CONCLUSION

Cette étude qui a pour objectif de détecter les changements d'occupation du sol et analyser la dynamique des terres salées dans le Département de Foundiougne a permis d'appréhender les tendances évolutives des différentes entités. Les images satellites Landsat retenues dans le cadre de ce travail sont avérées appropriées pour ces genres de problématiques.

La méthode de classification supervisée a permis de discriminer six (6) classes d'occupation du sol du milieu d'étude. L'indice de Kappa de la matrice de confusion est de 90% pour 1986, 87% pour 2000 et 92% pour 2015. Les six classes identifiées ont permis d'observer une évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol dans l'espace étudié. Les taux d'évolution montrent une progression des tannes (109,31%), une augmentation de la mangrove (12,48%) et des forêts (41,76%), une régression de la classes eau, des vasières et des sols nus avec respectivement (-3,20%), (-63,80%) et (-15,63%). Cette étude montre également l'importance de la télédétection dans la compréhension des modifications profondes de l'occupation du sol et la lutte contre la dégradation des ressources naturelles. De nos jours, le changement climatique constitue une menace à laquelle sont soumises les ressources naturelles. Il peut avoir des conséquences néfastes comme la réduction des superficies cultivées.

L'étude de détection des changements constitue une démarche efficace permettant une évaluation rapide de la dynamique de l'occupation du sol. Les images satellites Landsat couvrant une longue période combinée aux outils de la télédétection spatiale ont permis d'estimer les superficies des unités morphologiques du site d'étude. Les résultats de cette étude peuvent paraître utiles à la mise en place de stratégies de restauration et de conservation des ressources naturelles dans la région. En perspective, pour mieux étudier ou suivre l'évolution de l'occupation du sol, il serait important de faire recours aux images satellites à très haute résolution spatiale afin d'effectuer une analyse plus détaillée et estimer avec plus de précision les changements survenus au cours de la période étudiée.

REFERENCES

- [1]. Legros J. P. La salinisation des terres dans le monde. 2009 : 13.
- [2]. Le Borgne, J. La pluviométrie au Sénégal et en Gambie. Université Cheikh Anta Diop de Dakar/Sénégal. 1988 :95.
- [3]. Sadio S. Etude pédologique des facteurs de mortalité des essences forestières introduites en milieux salés au Sénégal. ORSTOM/Dakar. 1986 : 66.
- [4]. Marius C. et Lucas. Holocene mangrove swamps of West Africa: sedimentology and soils. *Journal of African Earth Sciences*. 1991: 41-54.
- [5]. Diop E. S. la côte ouest-africaine du Saloum (Sénégal) à la Mellanorée (Rep. De Guinée). Etudes et thèses. Paris. 1990 : 366.
- [6]. Ruiz M. L. Mise en place d'une méthode de détection de changement orientée objet sur une série temporelle d'images satellites optiques : application a la zone périurbaine de Colmar. Mémoire de soutenance de Diplôme d'Ingénieur INSA. 2016 : 84.
- [7]. Lambin E. F, Geist H, Lepers E. Dynamics of land use and cover change in tropical regions. *Annual Review of Environment and Resources*. 2003 ; 28: 205–241.
- [8]. Kosuth P. Les dossiers d'agropolis international, Information spatiale pour l'environnement et les territoires. 2010 : 4.
- [9]. Turner, B. L. et Mc Candless S. How Humankind Came to Rival Nature: A brief History of the Human-Environment Condition and the Lessons Learned. in *Earth System Analysis for Sustainability*, eds. Clark, William C., Crutzen, Paul, and Schellnhuber, H. John, Cambridge, MA : MIT Press. 2005: 227-43.
- [10]. Forsyth T. questioning the impacts of shifting cultivation. *Watershed*.1999; 5, (1) : 23-29.
- [11]. Goldewijk K. K. Estimating global land use change over the past 300 years: The HYDE database. *Glob. Biogeochem. Cycles*. 2001 ; 15, (2) : 417-434.
- [12]. McKee, T. B., Doesken, N. J., and Kleist, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*, Boston, MA: American Meteorological Society. 1993 : 179-184.
- [13]. Soro G., Ahoussi E. K., Kouadio E. K., Soro T. D., Oulare S., Saley, Soro M. B. N., Biemi J. 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.
- [14]. Guerinaï A. Analyse spatio-temporelle par télédétection de la région de Djelfa : évolution de l'occupation du sol. Mémoire de Magistère en sciences agronomiques. ENSA El Harrach-Alger. 2012 : 109.
- [15]. Singh, A. Digital change detection techniques using remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*. 1989; 10 : 989-1003.
- [16]. Mougnot B. Effets des sels sur la réflectance et télédétection des sols salés. 1993 : 10.
- [17]. Sarr A. S. Cartographie des changements de l'occupation du sol entre 1990 et 2002 dans le nord du Sénégal (Ferlo) à partir des images Landsat, <http://cybergeog.revues.org/22707>. 2007.
- [18]. Oszwald J. Dynamique des formations agroforestières en Côte d'Ivoire (des années 1980 aux années 2000) : Suivi par télédétection et développement d'une approche cartographique. Thèse de doctorat de Géographie. Université des Sciences et Technologies de Lille. 2005 : 74-75.
- [19]. Hoang K. H. Les changements de l'occupation du sol et ses impacts sur les eaux de surface du bassin versant. Le cas du bassin versant de la rivière Cáu (Viêt-nam). Université du Québec. Mémoire de Maitrise. 2007 : 127.

Dome TINE, et al. "Détection de changement d'occupation du sol et analyse de la dynamique des terres salées dans le Département de Foundiougne (Sénégal)." *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*, 10(4), 2020, pp. 18-31.