

DETECTION DES ZONES DE DEGRADATION ET DE REGENERATION DE LA COUVERTURE VEGETALE DANS LE SUD DU SENEGAL A TRAVERS L'ANALYSE DES TENDANCES DE SERIES TEMPORELLES MODIS NDVI ET DES CHANGEMENTS D'OCCUPATION DES SOLS A PARTIR D'IMAGES LANDSAT

Boubacar SOLLY*¹, El Hadji Balla DIEYE¹, Oumar SY¹, Aruna M JARJU², Tidiane SANE¹

¹Département de Géographie, Laboratoire de Géomatique et d'Environnement, UFR des Sciences et Technologies, Université Assane SECK de Ziguinchor, BP 523 (Sénégal).

²Academic Support Coordinator King Graduate School-Monroe College, New York (États-Unis).

*b.solly1087@zig.univ.sn ; Tel : (+221) 771 516 283

Résumé

Cette étude vise à détecter et cartographier la dégradation et la régénération de la couverture végétale durant ces deux dernières décennies en Haute-Casamance, située dans le sud du Sénégal. Elle s'appuie sur l'analyse des tendances de séries temporelles d'images MODIS NDVI acquises sur la période 2000-2018, sur la cartographie des changements d'occupation et d'utilisation des sols (LULCC) faite à partir d'images Landsat (ETM+ 1999 et OLI 2018), et sur une analyse conjointe des tendances de NDVI et LULCC. L'étude a révélé d'importants changements en termes d'occupation et d'utilisation des sols, notamment la conversion de la forêt à la savane (13,5 %), et de la savane aux zones de culture et d'habitat (7,9 %). Des tendances négatives significatives ($p < 0,1$) du NDVI (en lien avec la conversion forêt-savane et forêt-zones de culture et d'habitat) sont observées sur 2,1% de la zone étudiée et indiquent une dégradation de la végétation en particulier le long de la frontière avec la Gambie, sur l'axe Pata-Ndorna, dans le centre de la zone d'étude, et autour de Médina Gounass. Par ailleurs, des tendances positives significatives ($p < 0,1$) sur 1,8 % de la surface de la zone d'étude témoignent de la régénération dans le sud et sont liées à la conversion des zones de culture en savane et en forêt. L'analyse conjointe des tendances NDVI et LULCC indique une dégradation significative au sud de Kerewane et de Niaming, sur l'axe Ndorna-Pata, autour de Médina Gounass, et vers Saré Coly ; et une régénération significative à la frontière nord-est, au nord de Mampatim, au sud vers Bagadadji et Médina El Hadji, et entre Linkering-Paroumba. Cette analyse a également révélé que les deux séries d'images (NDVI et Landsat) sont cohérentes spatialement et que l'essentiel des tendances de productivité de la végétation est expliqué par les changements d'utilisation des sols et non par le climat.

Mots-clés : Couverture végétale, Tendances NDVI, Landsat, Dégradation, Régénération, Sud Sénégal

Abstract

Located in the south of Senegal, the Upper-Casamance (present-day Kolda region) has a strong vegetation dynamic mainly due to the clearing of land for agricultural needs, bush fires, population growth and uncontrolled logging. In such a situation, mapping and quantification of changes in vegetation cover become relevant for a more rational and sustainable management of plant resources, but also for the achievement of the Sustainable Development Goals. This study aims to detect the degradation and regeneration of vegetation cover during the last two decades in Upper-Casamance. It is based on an analysis of the trends of MODIS NDVI images time series acquired over the period 2000-2018, on a land cover and use changes (LULCC) maps established from Landsat images (ETM+ 1999 and OLI 2018), and a joint analysis of NDVI and LULCC trends. Data processing is based on the calculation of the Kendall correlation (τ) and the p significance test at the 10% threshold, and on a multistage unsupervised classification, respectively. The study shows significant changes in land cover and land use, including conversion from forest to savannah (13.5%), and from savannah to crop and habitat areas (7.9%). Significant negative trends in NDVI (related to forest-savanna conversion and forest-cropping and habitat areas) are observed in 2.1% of the study area and indicate vegetation degradation especially along the border with Gambia, on the Pata-Ndorna axis, in the centre of the study area, and around Medina Gounass. On the other hand, significant positive trends on 1.8% of the study area are evidence of regeneration in the south and are linked to the conversion of cultivated areas into savanna and forest. Joint analysis of NDVI and LULCC trends indicated significant degradation in south of Kerewane and Niaming, on the Ndorna-Pata axis, around Medina Gounass, and towards Saré Coly; and significant regeneration at the northeast border, north of Mampatim, to the south towards Bagadadji and Medina El Hadji, and between Linkering-Paroumba. This analysis also revealed that the two sources of data (NDVI et Landsat) are spatially consistent and that most of the trends in vegetation productivity are explained by changes in land use and not by climate.

Keywords : Vegetation cover, NDVI trends, Landsat, Degradation, Regeneration, South Senegal

1. Introduction

La dégradation du couvert végétal naturel, considérée comme une perte de productivité végétale (réduction de la biomasse), constitue une préoccupation environnementale pressante (Yengoh et al., 2015). En effet, grâce à la cartographie des changements d'occupation et d'utilisation des terres (Stancioff et al., 1986 ; Andrieu et Mering, 2008 ; CILSS, 2016 ; FAO, 2015 ; Diédhiou, 2019 ; Solly et al., 2020b) et à l'analyse des tendances de NDVI (Diouf et Lambin, 2001 ; Budde et al., 2004 ; Li et al., 2004), de nombreux auteurs ont montré qu'au Sénégal le couvert végétal a connu une dégradation pendant les années 1970-80 avant de connaître une tendance à la régénération, et cela à l'échelle de certaines zones géographiques ou écorégions (Tappan et al., 2004).

Directement impactées par le développement agricole, les forêts claires et galeries ainsi que les savanes ont diminué de 11 930 km² entre 1975 et 2013 au Sénégal (CILSS, 2016). À l'échelle des écorégions, cette perte est différemment appréciée. A titre d'exemple, entre 1982 et 2003, une tendance négative (Neeti et Eastman, 2011) difficile à expliquer a été observée en Casamance (Li et al., 2004), et une tendance positive et significative a été relevée dans la zone pastorale et dans la vallée du fleuve Sénégal (Herrmann et al., 2005). De même, dans le Bassin Arachidier, une tendance positive à l'augmentation de la productivité, qui s'est traduite par l'extension de grandes parcelles de prairies entre 1992 et 2001, a été relevée (Budde et al., 2004). En zone humide (zone de mangrove), une tendance à la dégradation a été notée durant les années de sécheresse (1970-1980), suivie d'une tendance à la régénération depuis la fin de la décennie 1990 (Andrieu et Mering, 2008 ; Diéye et al., 2013) coïncidant au retour à des conditions pluviométriques meilleures (Bodian, 2014).

Plusieurs facteurs expliquent ces modifications au Sénégal. En effet, si les actions de l'homme semblent être les plus indexées à l'origine de la dégradation de la couverture végétale (Stancioff et al., 1986 ; Mbow, 2000 ; CILSS, 2016), il n'en est pas moins des conditions climatiques (Michel, 1990), qui sont par ailleurs l'un des principaux moteurs importants de leur régénération (Leroux et al., 2017). Ces dernières sont également considérées par Herrmann et al. (2005) comme étant le principal facteur de changement du couvert végétal en Afrique de l'Ouest.

Toutes ces connaissances sont rendues partiellement possibles grâce à la disponibilité et l'utilisation des données de télédétection. En effet, avec l'avènement des séries temporelles d'images NOAA AVHRR depuis 1981 et MODIS NDVI depuis 2000, l'analyse des modifications de la couverture végétale s'est accélérée

en Afrique de l'Ouest d'une manière générale, et au Sénégal en particulier à travers l'analyse des tendances (Solly et al., 2021). Ces séries temporelles fournissent les données les plus appropriées pour analyser la tendance des changements liés aux phénomènes naturels et humains (Hmimina et al., 2013). Grâce à l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), elles permettent d'identifier la dégradation et la régénération des terres (Eckert et al., 2015). Cet indice fournit des informations sur la capacité photosynthétique des couverts végétaux, la teneur en eau des feuilles, l'humidité des sols, la qualité phytosanitaire, la productivité primaire, la biomasse, etc. Il permet de détecter, par des changements de productivité de la végétation, des changements de couvert végétal (Guo et al., 2018). De plus, il est fortement corrélé à la pluviométrie dans de nombreux pays d'Afrique de l'Ouest (San Emeterio et al., 2011), surtout dans les zones qui enregistrent moins de 1000 mm de pluie par an (Nicholson et al., 1990).

À l'échelle locale ou des écorégions, les images aériennes et satellitaires à haute et très haute résolution spatiale (Corona, Landsat et Spot) disponibles depuis les années 1965 et 1972 sont couramment utilisées (Sylla et al., 2019 ; Diédhiou, 2019 ; Solly et al., 2020b). Ces images sont particulièrement utiles dans la mesure où elles permettent de déterminer et de détecter les modifications les plus fines de la quantité, de la qualité et de la distribution de la végétation. Ces modifications peuvent indiquer des changements de la capacité des écosystèmes à soutenir les communautés, en termes de ressources et de services environnementaux (Safriel, 2007).

Ainsi, si d'aucuns se sont limités à l'utilisation des seules séries temporelles, d'autres par contre ont privilégié les images à haute résolution spatiale (Landsat, Spot ou Corona) pour déterminer les modifications de la couverture végétale au Sénégal. Toutefois, la combinaison de ces deux données semble fournir des résultats plus satisfaisants pour détecter et surtout expliquer la dégradation et la régénération du couvert végétal (Eckert et al., 2015 ; Zougrana et al., 2018 ; Leroux et al., 2017 ; Montfort et al., 2020 ; Noël Gansaonré et al., 2020).

C'est cette démarche qui combine l'analyse des tendances de séries temporelles MODIS NDVI et les changements d'occupation des sols que nous avons entreprise dans cette étude afin de détecter et expliquer la dégradation et la régénération du couvert végétal naturel durant ces deux dernières décennies dans le sud du Sénégal. Les objectifs spécifiques sont (1) d'identifier et de localiser les différentes tendances de la productivité de la végétation entre 2000 et 2018 (2) d'évaluer et de détecter les conversions du couvert végétal naturel durant la même période, et (3) de

détecter les zones de dégradation et de régénération significatives à travers une analyse conjointe des tendances NDVI et des changements de la couverture végétale.

Cette étude s'inscrit dans la production de connaissances pour mieux atteindre l'objectif 15 des Objectifs du Développement Durable, sur la préservation et la restauration des écosystèmes terrestres.

2. Zone d'étude

La zone d'étude correspond à la Haute-Casamance. Administrativement, il s'agit de la région de Kolda. Elle est située entre 12 ° 20 et 13 ° 40 de latitude nord, et entre 13 ° et 16 ° de longitude Ouest. Elle est limitée à l'Est par la région de Tambacounda (Sénégal Oriental), à l'ouest par la région de Sédhiou (Moyenne Casamance), au Nord par la République de Gambie et au Sud par les Républiques de Guinée et de Guinée-Bissau (cf. Figure 1). Elle compte trois départements que sont Kolda, Vélingara et Médina Yoro Foulah. Elle couvre une superficie de 13 721 km² soit 7 % du territoire national (ANSD, 2017).

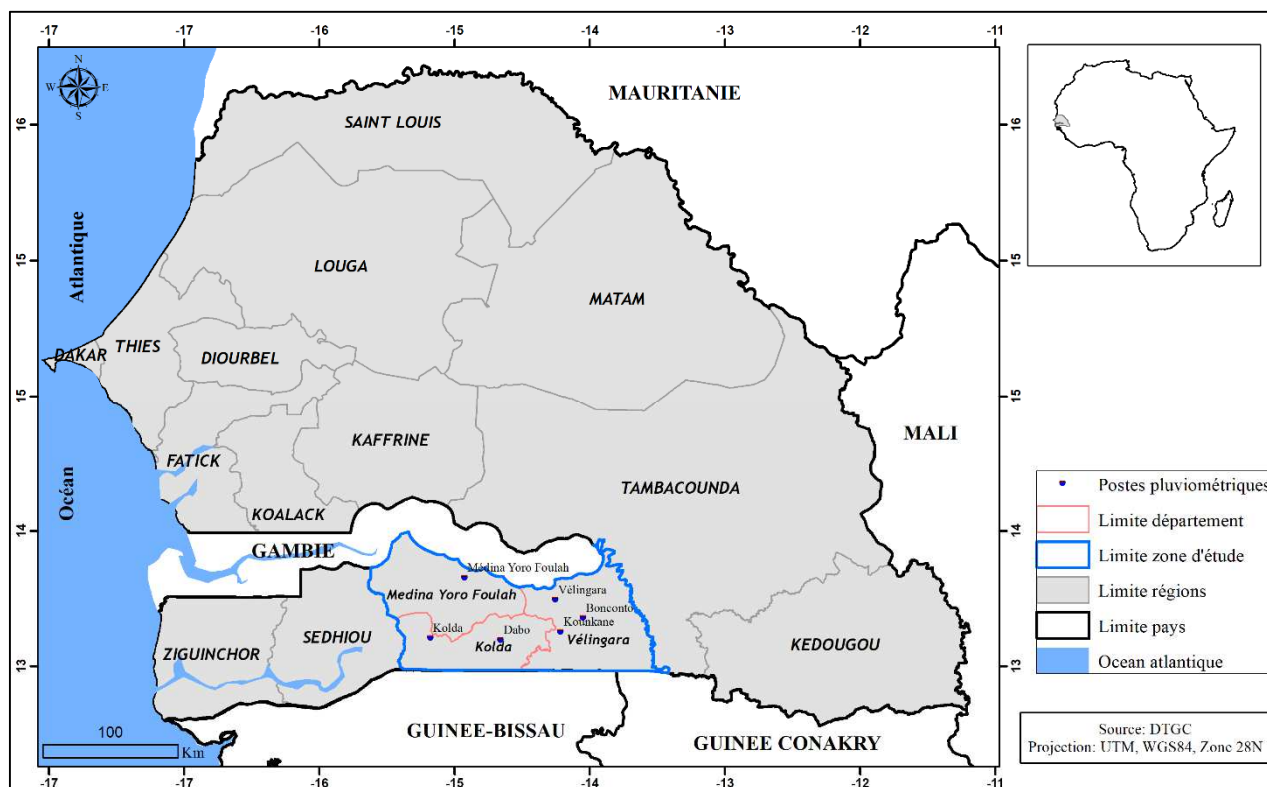


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude dans le sud du Sénégal

Du point de vue climatique, la zone d'étude appartient au domaine soudanien. Une partie étant dans la zone nord et une autre dans la zone sud (Sagna, 2005). Elle se situe entre les isohyètes 800 et 1100 (Dione et al., 2020). À l'instar des pays du Sahel, la zone d'étude est marquée par la longue période sèche des années 1970-1980. Un retour à des conditions plus humides a été noté depuis 1999, même si les précipitations annuelles restent inférieures à celles d'avant 1970 (Bodian, 2014). Entre 2000-2018, la précipitation maximale est de 1277 mm et celle minimale de 689 mm (cf. Figure 2). La moyenne pluviométrique est de 959 mm. Neuf années sur 19 ont enregistré des précipitations supérieures à la moyenne de la période. Durant ces 19 ans, nous ne notons pas de tendance significative de la pluviométrie

annuelle. La moyenne de l'écart-type temporelle est respectivement de 245mm à la station de Kolda, 178mm à Vélingara, 170mm à Médina Yoro Foulah, 180mm à Dabo, 277mm à Bonconto et 229mm à Kounkané.

Sur le plan de la végétation, le climat se traduit par des formations à affinité guinéenne, telles que la forêt claire, la forêt-galerie, la savane boisée et la savane arborée à arbustive (Solly et al., 2020b). La transformation de la forêt en savane ("savanisation") se réalise par l'intermédiaire d'une mosaïque "forêt-savane" au sein de laquelle la forêt laisse progressivement la place à la savane.

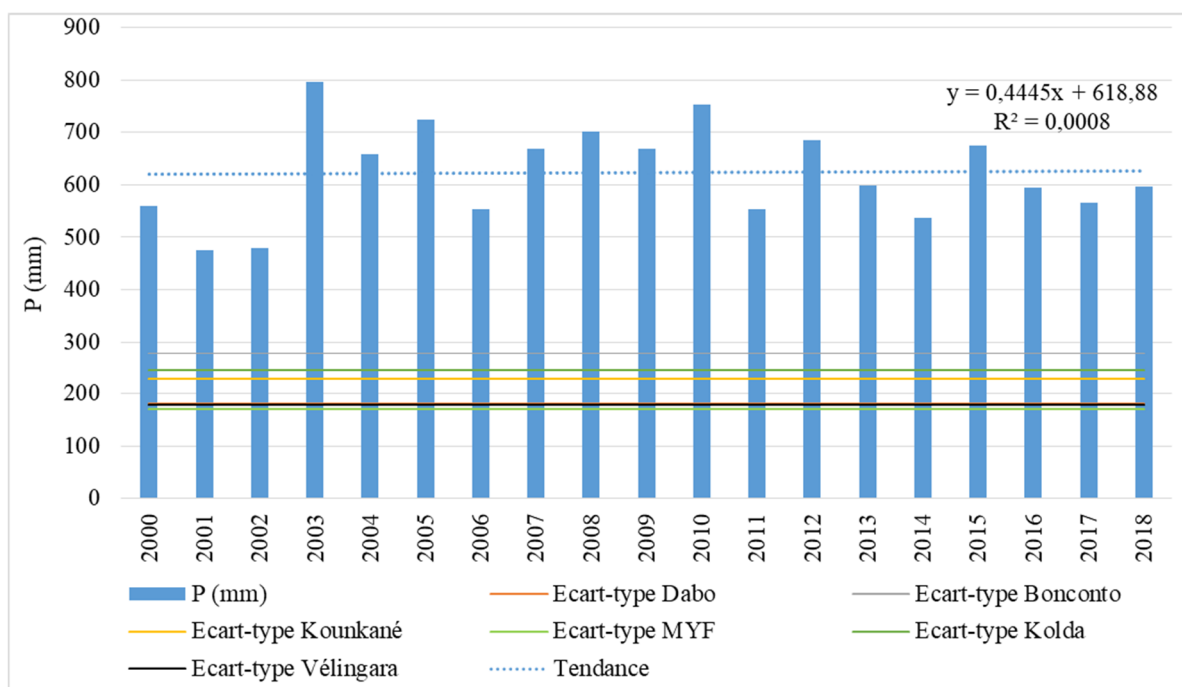


Figure 2 : Evolution des précipitations annuelles entre 2000 et 2018 (moyenne des stations de Kolda, Vélingara, Médina Yoro Foulah, Dabo, Bonconto et Kounkané) (source : ANACIM)

3. Matériels et méthodes

3.1. Données

3.1.1 Données MODIS NDVI

Pour détecter les différentes tendances de la productivité de la végétation, nous avons utilisé les données MODIS NDVI. Nous avons téléchargé la version 6 du produit MOD13Q1 (indices de végétation du spectromètre imageur à résolution moyenne Terra) à partir du site <https://search.earthdata.nasa.gov/>. Les produits sont fournis au format HDF-EOS (Hierarchical Data Format for NASA's Earth Observing System), et sont composés de plusieurs bandes, dont le NDVI. La série utilisée ici s'étend de 2000 à 2018.

Les images sont disponibles depuis la deuxième quinzaine du mois de février 2000. Elles sont fournies au pas de temps de 16 jours, et à la résolution spatiale de 250 m. En termes de longue série temporelle NDVI (>10 ans), c'est la série la mieux résolue spatialement qui existe à l'heure actuelle. Comparées aux données NOAA AVHRR, les données MODIS ont montré de meilleures performances au Sénégal du fait de leur valeur maximale de saturation élevée (Fensholt, 2004).

3.1.2 Données Landsat

Pour évaluer l'état de l'occupation des sols et les conversions du couvert végétal, nous avons utilisé les images du satellite Landsat. Deux années d'acquisition ont été retenues : 1999 (L7 ETM+) et 2018 (L8 OLI) (cf. Tableau 1).

Année	Date	Path	Row
1999	29 Nov 1999	204	051
	08 Déc 1999	203	
2018	11 Déc 2018	204	051
	04 Déc 2018	203	

Tableau 1 : Images Landsat utilisées

Les images sont acquises entre novembre et décembre sur le site <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Elles sont fournies avec un niveau de traitement T1 (niveau 1 avec des comptes numériques) et sont orthorectifiées par l'USGS. La zone d'étude concernée n'est pas couverte de nuages. Les images sont fournies avec une résolution spatiale de 30 m. Cette résolution est suffisante pour cartographier et quantifier l'évolution spatio-temporelle de la couverture végétale.

En outre, les mois d'acquisition (novembre et décembre) permettent une bonne différenciation de la couverture du sol. Deux scènes (cf. Figure 3) ont été nécessaires pour couvrir toute la zone d'étude. Il s'agit de la scène p204-r051 et p203-r051.

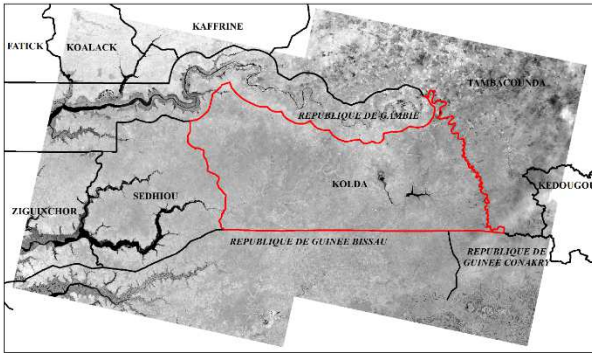


Figure 3 : Scènes p204-r051 (à gauche) et p203-r051 (à droite) de l'image Landsat

3.1.3 Présentation des données de terrain

Les données de terrains sont composées de points géoréférencés sur l'occupation des sols relevés lors de notre mission sur le terrain qui s'est déroulée du 19 mars au 6 avril 2018. Dix points par classe d'occupation des sols ont été relevés avec un GPS de type Garmin eTrex 30x (soit un total de 70 points). Dans cette étude, nous nous sommes intéressés aux 7 classes suivantes : forêt, savane, brûlis, zones de culture, zones d'habitats, plantations et surfaces en eau (cf. Figure 4).

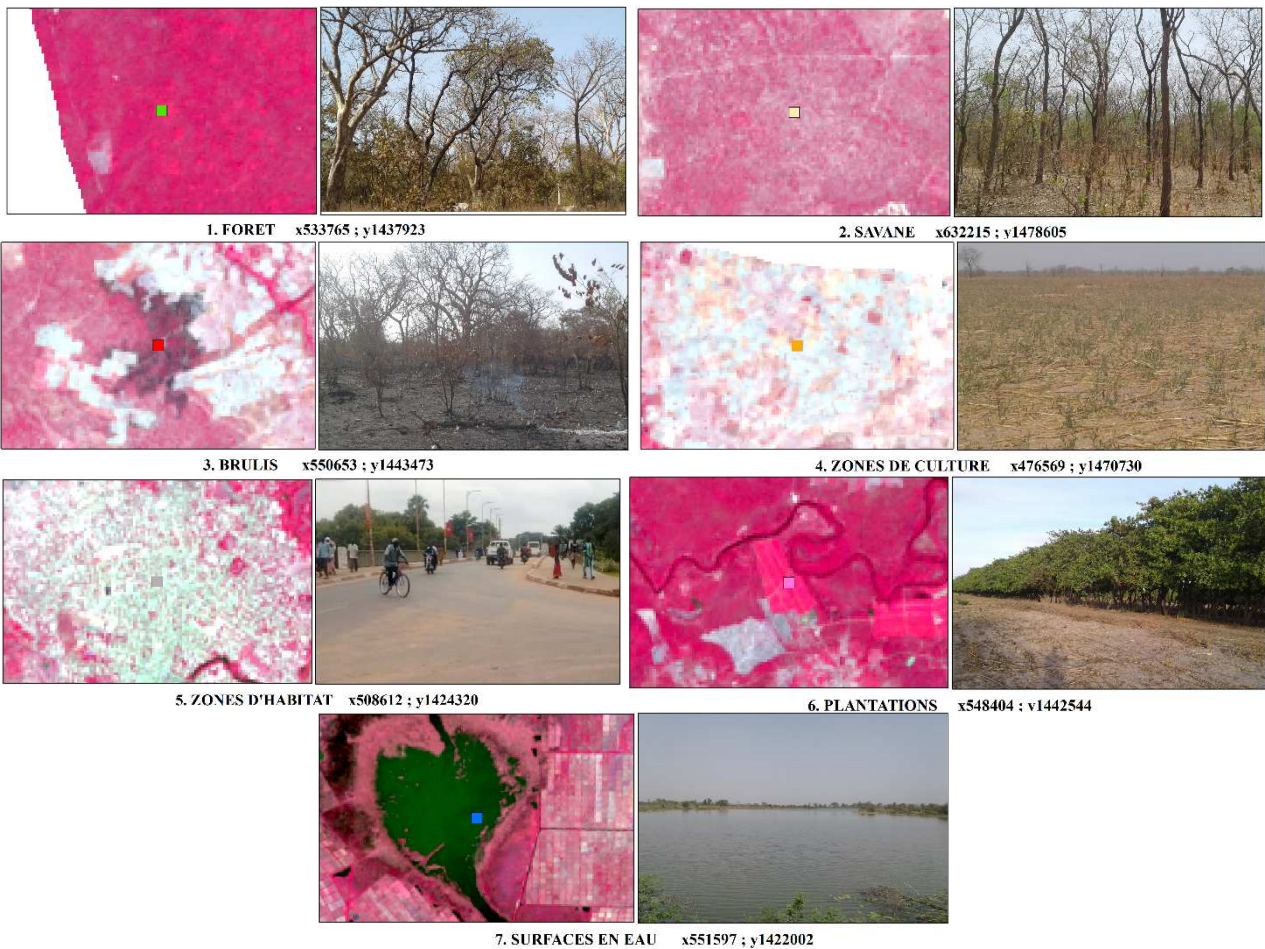


Figure 4 : Zoom sur les classes d'occupation des sols identifiées à partir de l'image Landsat OLI_TIRS 2018, leur correspondance thématique sur le terrain et les coordonnées géographiques des photos en UTM Zone 28N

La différenciation des types de formation s'est faite en se référant à la classification des formations végétales adoptée à la conférence de Yangambi en 1956 (Aubreville, 1957) telle qu'elle a été utilisée par Solly et al. (2020b).

3.2. Méthodes

3.2.1 Analyse des tendances de la couverture végétale à travers la corrélation de Man-Kendall

Il existe plusieurs approches pour étudier les tendances de la couverture végétale à partir des données MODIS NDVI. En effet, si d'aucuns ont utilisé le test contextuel de Mann-Kendall (Neeti et Eastman, 2011 ; Zewdie et al., 2017), d'autres par contre ont privilégié le test de tendance monotone de Mann-Kendall (Zoungrana et al., 2018), la corrélation ou « tau » de Kendall (τ) (Andrieu, 2018 ; Noël Gansaonré et al., 2020), ou plusieurs de ces tendances (Teferi et al., 2015). Il n'existe pas encore de

consensus à propos de la méthode la plus efficace pour effectuer une telle étude (San Emeterio et al., 2011).

Dans cette étude, nous avons utilisé la corrélation de Kendall (τ) ou « tau » de Kendall. Deux paramètres ont été considérés : le coefficient de corrélation « tau » et la significativité « p ». Le coefficient de corrélation varie entre -1 et +1, et mesure la relation entre deux séries de variables pour déterminer le degré auquel une tendance augmente, diminue ou reste inchangée (Wessels et al., 2012). La valeur de signification met en évidence l'importance de la tendance (Neeti et Eastman, 2011) et représente la mesure de la nécessité de rejeter une hypothèse nulle ($p=0$). La statistique de Mann-Kendall (S) est donnée par les équations 1 et 2, le tau et le test de significativité par les équations 3 et 4.

$$S = \sum_{i=1}^{x-1} \sum_{j=i+1}^x \text{signe}(x_i - x_j) \quad (1)$$

et

$$\text{signe}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1 & \text{si } x_i - x_j < 0 \\ 0 & \text{si } x_i - x_j = 0 \\ -1 & \text{si } x_i - x_j > 0 \end{cases} \quad (2)$$

où x_i et x_j sont les observations respectivement aux temps i et j .

$$\tau = \frac{2s}{n(n-1)} \quad (3)$$

et

$$p=2[1 - \Phi(|Z|)] \quad (4)$$

où n est la longueur de la série temporelle ;

Z suit ici une distribution normale standard, et une valeur positive (négative) de Z signifie une tendance à la hausse (à la baisse).

La démarche a débuté par la création d'une série temporelle (TSF), à partir du module « Earth Trends Modeler » sur Idrisi TerrSet, en utilisant l'ensemble de la série (2000-2018). La fonction Preprocess (Denoise) permet de lisser les séries temporelles en remplaçant les valeurs erratiques (notamment liées aux nuages) par des valeurs interpolées (cf. Figure 5).

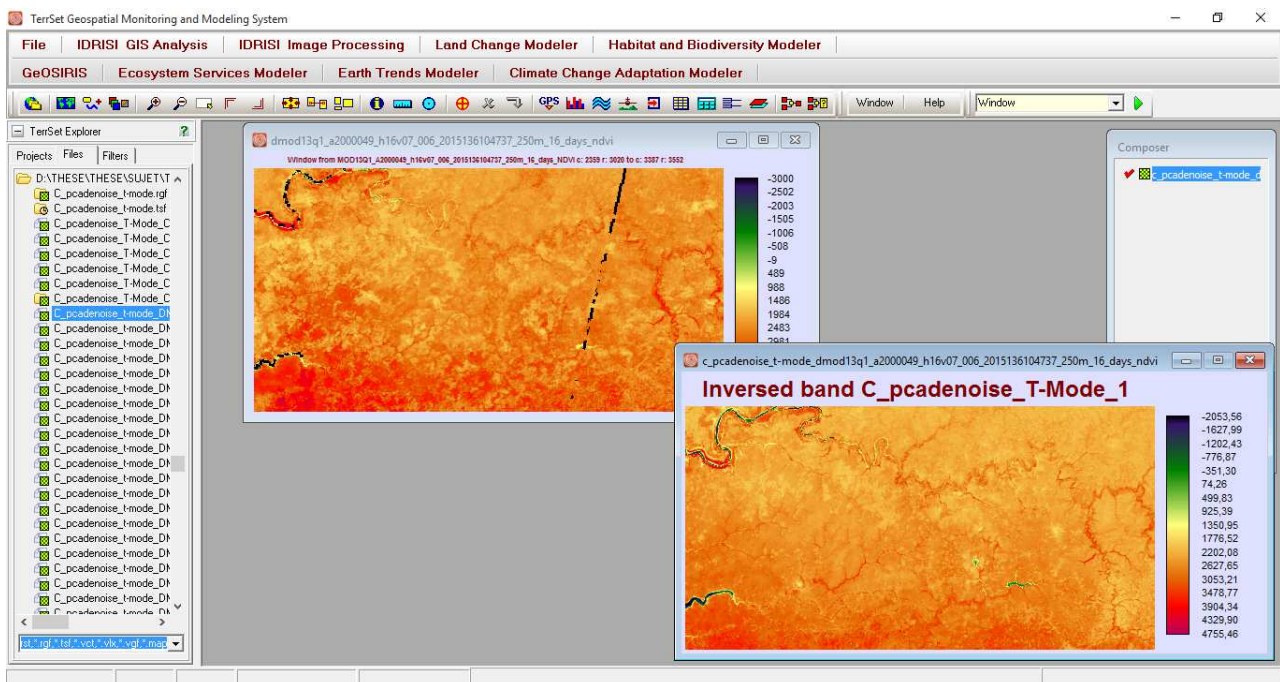


Figure 5 : Image avant et après lissage à partir du logiciel Idrisi TerrSet

Après cette étape, nous avons calculé la corrélation de Kendall à travers la régression sur les 437 valeurs de NDVI (23 synthèses x 19 ans). Ce calcul est associé à celui du test de significativité de p au seuil de 0,1. Le résultat a permis de classer les tendances (positive, négative et nulle) du NDVI et leur significativité.

3.2.2 Cartographie des changements de la couverture végétale

L'étude des changements de la couverture végétale a nécessité une étape de cartographie de l'occupation des sols à deux dates. Celle-ci s'est faite en utilisant la méthode de classification non supervisée en plusieurs

étapes telle qu'elle a été élaborée par Andrieu et Méring (2008), utilisée par Diédhiou (2019) et Solly et al., (2020 b) et détaillée dans les paragraphes qui suivent. Le choix de cette méthode s'explique par le fait qu'elle ne nécessite pas de données de terrain pour initialiser le processus (on n'a pas de relevés de terrain en 1999) car elle s'appuie uniquement sur les informations contenues dans l'image. Une fois que les pixels sont regroupés en fonction de leurs signatures spectrales, un label thématique leur est assigné (généralement par expertise ou en utilisant des données de terrain).

Dans un souci de bien superposer les images, nous avons commencé par la correction géométrique. Par la suite, pour une meilleure séparation des pixels, la première classification a été lancée sur quinze classes

en utilisant l'ensemble des bandes allant du bleu au moyen infrarouge. L'algorithme *K-means* est utilisé. Il a l'avantage d'attribuer aux pixels la classe la plus proche. Les classes spectrales résultantes ont fait l'objet d'une interprétation suivie d'un regroupement suivant la nomenclature retenue. Il convient de souligner que sur les sept thèmes d'occupation des sols à cartographier, il n'y a que deux qui n'ont pas pu être séparés à partir de cette première classification. Il s'agit des zones d'habitat et des plantations.

Ainsi, pour affiner la classification et aller vers une cartographie détaillée et précise de l'occupation des sols, chaque classe thématique a été isolée pour former le masque de cette classe (cf. Figure 6).

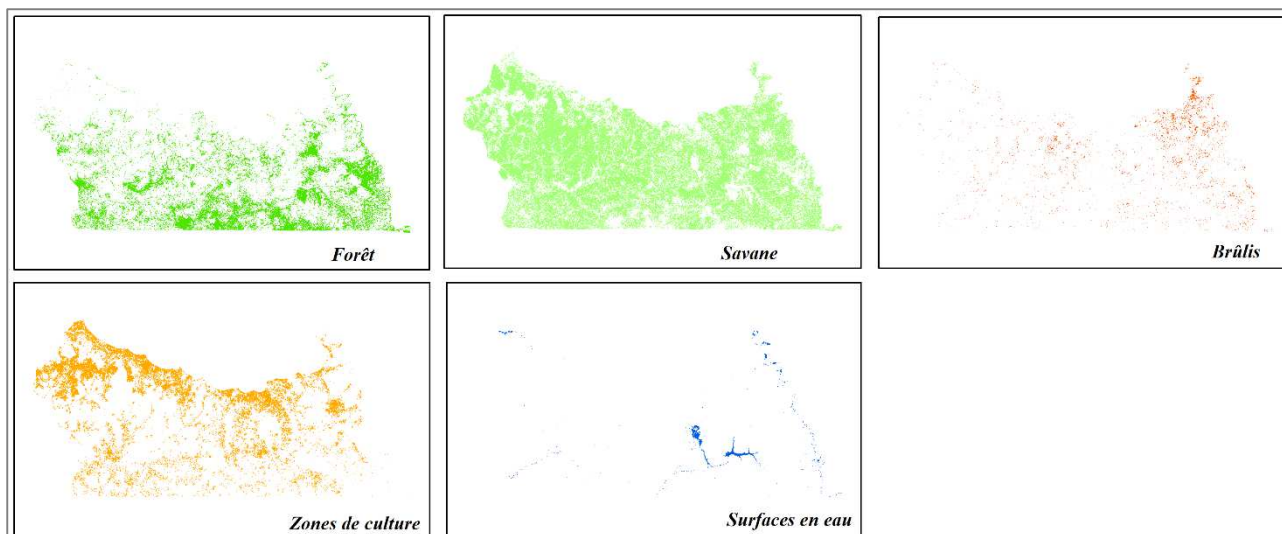


Figure 6 : Masque des classes thématiques issues du regroupement de la première classification de l'image Landsat OLI_TIRS 2018

Par la suite, nous avons lancé une nouvelle classification non supervisée sur 10 classes pour chaque masque thématique. Puis, nous avons de nouveau interprété les signatures spectrales des classes résultantes et reclassés selon la nomenclature retenue pour la cartographie de l'occupation des sols. L'objectif visé à travers la classification sur les masques thématiques est aussi de vérifier l'existence de groupes de pixels ne correspondant pas à la classe thématique obtenue à partir de la première classification, puis de les corriger. Cette opération a été répétée jusqu'à ce qu'il ne soit plus possible d'identifier un pixel n'appartenant pas au masque à partir duquel la classification a été réalisée.

Pour valider les cartes, nous avons utilisé les points GPS relevés sur le terrain. De même, nous avons fait un « survol aérien » sur *Google Earth* et mis à contribution des sources d'informations complémentaires. Il s'agit pour l'année 2018, de la carte des grands domaines de peuplements végétaux produite à l'échelle de 1/50 000 (ANAT, 2018) et la carte d'occupation des sols de la

Haute-Casamance produites à l'échelle de 1/40 000 (Solly et al., 2020b). Pour l'année 1999, nous avons consulté la carte d'occupation des sols du Sénégal de 2000, produite à l'échelle de 1/50 000 (CILSS, 2016) et celle produite à l'échelle de 1/3 000 000 (Tappan et al., 2004).

Pour élaborer les cartes de changements et déterminer les conversions de la végétation, les classes ont été recodées de 1 à 4. Nous avons regroupé les classes zones de culture et zones d'habitats pour former la classe « zones de culture et d'habitat » (ZCH); et les classes brûlis, plantations et eau pour former la classe « autres ». Ces dernières classes correspondent à des surfaces non agricoles (traces de feux à la date de prise de vue de l'image, vergers d'*Anacardium occidentale*, et surfaces en eau).

Puis nous avons additionné les deux cartes d'occupation des sols ci-dessus (1999 et 2018). Au final, six classes de changements ont été étudiées. Pour la dégradation

du couvert végétal, il s'agit du passage de la forêt à la savane, de la forêt aux zones de culture et d'habitat, et

de la savane aux zones de culture et d'habitat (cf. Tableau 2).

Code	Dégradation	Code	Régénération	Code	Autres changements
1-2	Fo-Sa	3-1	ZCH-Fo	1-1 ; 2-2 ; 3-3 ;	Autres
1-3	Fo-ZCH	3-2	ZCH-Sa	1-4 ; 4-1 ; 2-4 ;	Autres
2-3	Sa-ZCH	2-1	Sa-Fo	4-2 ; 3-4 ; 4-3 ; 4-4	Autres

Fo : Forêt ; Sa : Savane ; ZCH : Zones de culture et d'habitat

Tableau 2 : Codes et changements des classes d'occupation des sols étudiées

Pour la régénération, il s'agit du passage des zones de culture et d'habitat à la forêt, des zones de culture et d'habitat à la savane et de la savane à la forêt. Le reste des changements est mis dans le champ « autres » (incluant les surfaces sans changements).

3.2.3 Analyse conjointe des tendances NDVI et des changements de la couverture végétale

Pour quantifier l'accord ou les désaccords entre les changements observés via le NDVI et l'occupation des sols, nous avons additionné les deux résultats.

Pour cela, nous avons d'abord rééchantillonné la carte des changements d'occupation des sols (Landsat) à la résolution de 250 m (MODIS) en choisissant la classe majoritaire. Ensuite, nous avons recodé les classes en trois pour le NDVI, et attribué aux tendances significatives négatives le code 1, aux tendances non significatives le code 2, et aux tendances significatives positives le code 3.

Pour les changements d'occupation des sols, nous avons attribué à la classe dégradation le code 1, à la classe « autres changements » le code 2, et à la classe régénération le code 3.

Les accords et désaccords sont analysés visuellement à l'aide de l'iconographie dénommée « zone » dans les cartes.

4. Résultats

4.1. Tendances du NDVI de 2000 à 2018

La moyenne de la corrélation de Kendall entre 2000-2018 indique une forte variation spatiale du NDVI en Haute-Casamance avec une tendance dans l'ensemble non significative (cf. Figure 7). Les valeurs de corrélation varient entre 0,31 et -0,52.

Plusieurs zones marquées par une tendance à l'augmentation du NDVI ont été détectées. Cette tendance positive du NDVI représente 63,6% de la zone d'étude. Ainsi, nous avons le sud-Ouest entre Salikégné, Médina El Hadji, Guiro Yero Bocar, Saré Yoba Diega, et entre Bagadadji et Dabo (zone 1), qui est principalement occupée par la classe forêt. Il en est de même dans la partie Ouest (dans le département de Médina Yoro Foulah) précisément aux alentours de Ndorna (2) et au sud-ouest de Bouroucou (3), ainsi qu'au sud de l'axe Bignarabé-Fafacourou (4) et dans la partie Ouest de l'axe Fafacourou-Médina Yoro Foulah (5). Le long de la partie Est du département de Vélingara, où l'on retrouve de vastes étendues de savanes, est également marquée par une tendance à l'augmentation de la productivité de la végétation. Dans cette partie de la région, les plus fortes tendances, d'ailleurs significatives, sont notées à l'extrémité nord-est (6). De même, au nord de Diaobé Kabendou (7) (où se trouve le bassin hydroagricole de l'Anambé), nous notons des pixels de tendances positives significatives.

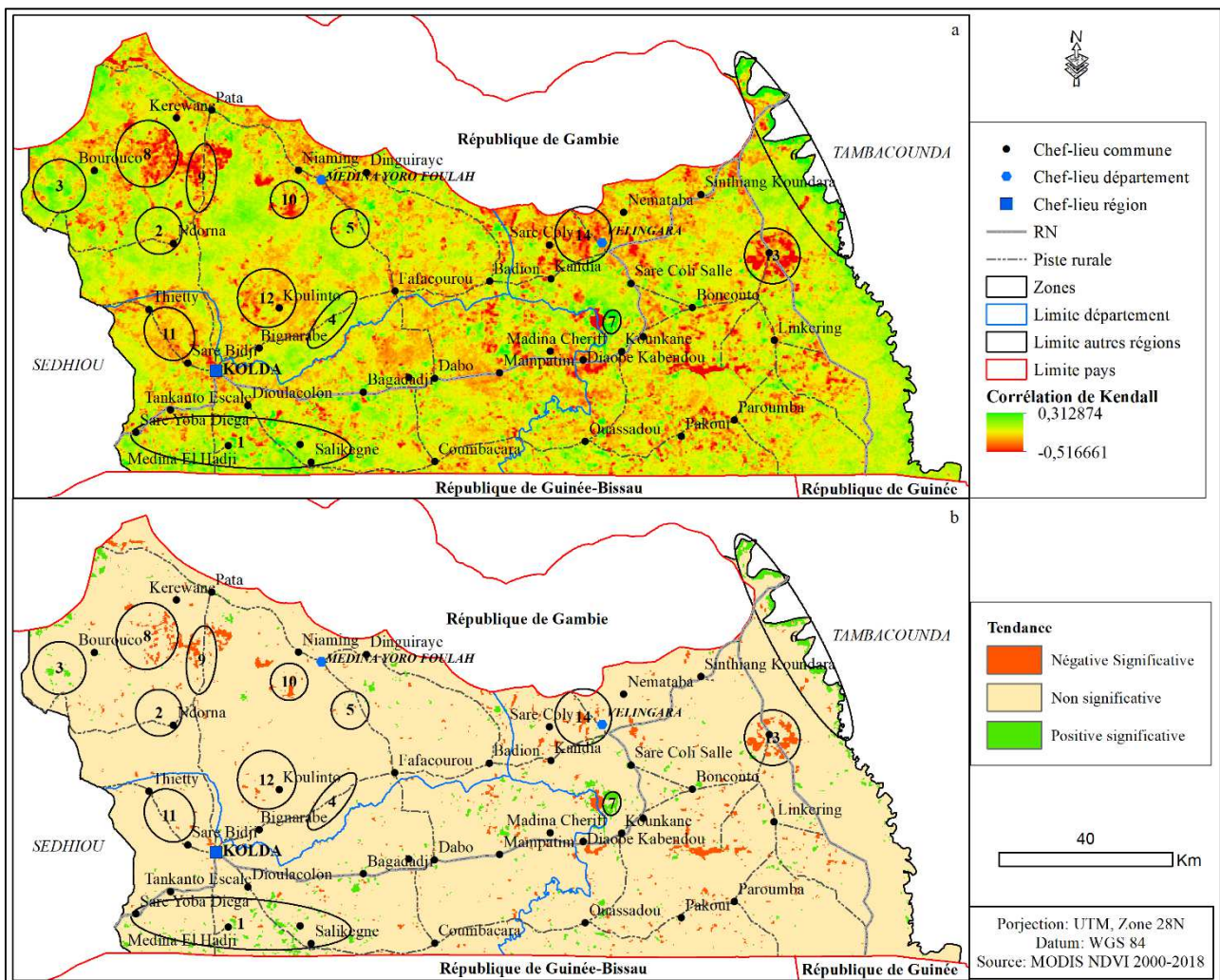


Figure 7 : (a) Tendances du NDVI entre 2000 et 2018 en Haute-Casamance ; (b) Significativité au seuil de 10%.

Le long de la frontière avec la Gambie, ainsi que le centre de la zone d'étude et vers le sud-est, sont marqués par une tendance à la baisse du NDVI. Cette tendance représente 36,4% de la zone d'étude. Cette tendance témoigne de la dégradation de la couverture végétale naturelle transformée pour l'essentiel en zones de culture et d'habitat. C'est le cas entre Bouroucou et Kerewane (8), sur l'axe Pata-Ndorna (9), et au sud de Niaming (10) où la tendance est significativement négative. À l'Est également, autour de Médina Gouass (13), de Vélingara (14), et aux alentours de Koulinto (12), la même situation est notée. À l'Ouest, c'est-à-dire entre Saré Bidji et Thiétty (11) nous notons la même tendance à la diminution du NDVI toutefois non significative au seuil de 10 %.

Le pourcentage de tendance positive significative (au seuil de 10 %) est de 1,8 % ; celle négative significative est de 2,1 %.

4.2. Changements de la couverture végétale entre 1999 et 2018

La figure 8 représente l'occupation des sols en 1999 et 2018. Elle indique une diminution globale de la forêt suivant un gradient nord-sud en faveur de la savane, et une augmentation des surfaces agricoles principalement au détriment de la savane. En 1999, la savane était le couvert dominant avec 569 054 ha (soit 41,3 %), suivi de la forêt qui occupait 400 022 ha. Les zones de culture occupaient 368 716 ha. En 2018, les zones de culture occupaient 426 678 ha soit 31 % de la zone d'étude. La forêt et la savane occupaient respectivement 230 726 ha et 696 682 ha.

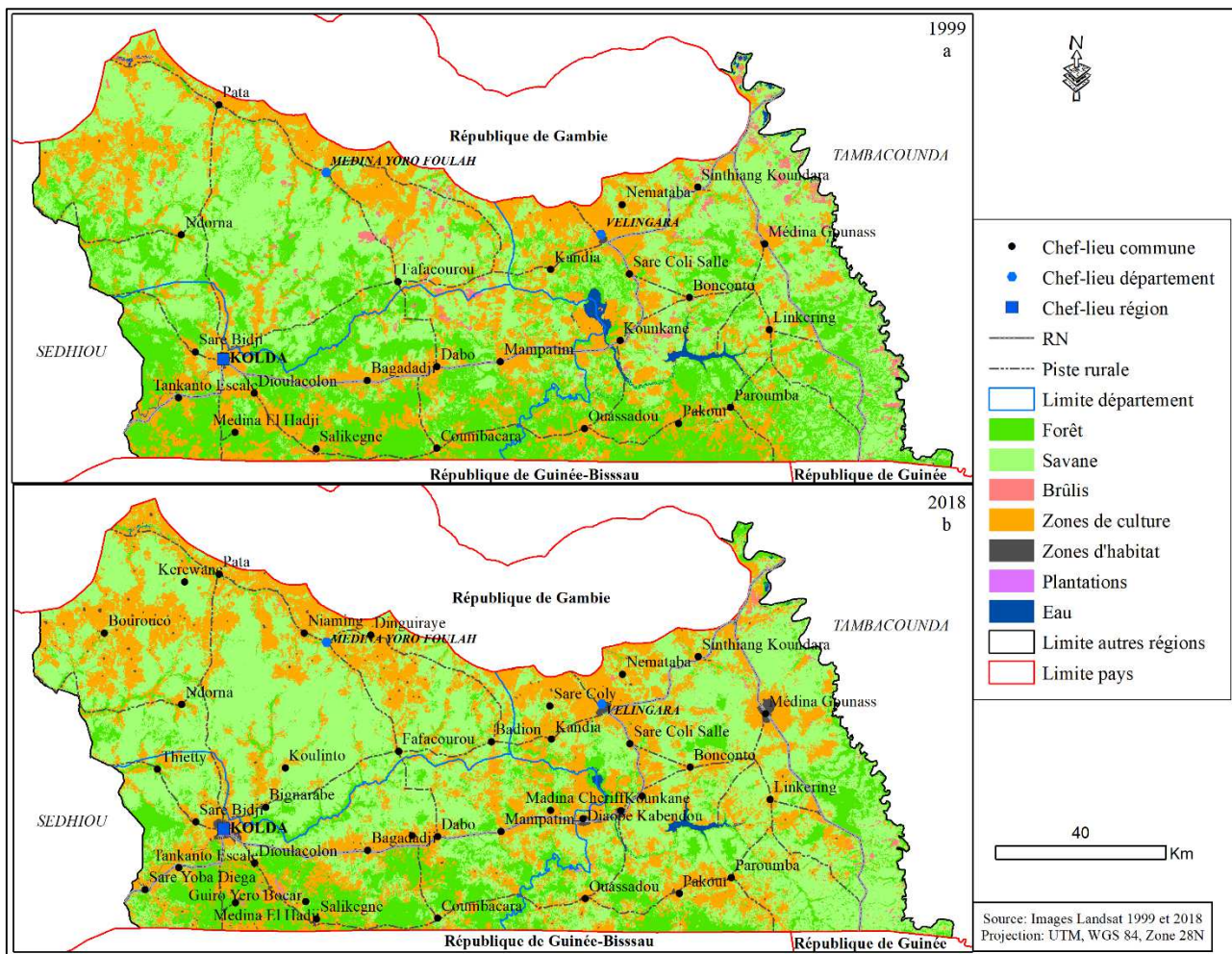


Figure 8 : État de l'occupation du sol en 1999 (a) et en 2018 (b).

La cartographie des changements de la couverture végétale indique une forte dégradation de la couverture végétale. Cette dégradation est beaucoup plus marquée dans le centre-Ouest et dans le sud de la zone d'étude pour ce qui est du passage de la forêt à la savane (cf. Figure 9). Elle concerne 13,5 % des changements (cf. Tableau 3). Pour ce qui est du passage de la forêt aux zones de culture et d'habitat (conversion totale de 3,4 %) et de la savane aux zones de culture et d'habitat (conversion totale de 7,9 %), la dégradation est plus marquée dans le nord-Ouest, le centre, et le sud. Dans le département de Médina Yoro Foulah, plus précisément au sud de Kerewane (zone 8) et de Niaming (10), et sur l'axe Ndorna-Pata (9), une importante conversion de la savane en zones de culture et d'habitat est notée. La corrélation de Kendall a d'ailleurs montré une tendance à la diminution de la productivité de la végétation dans cette même zone. À l'Ouest également, précisément autour de Médina Gounass (13), et dans la zone de Sinthiang Koundara (15), d'importantes surfaces sont concernées par la dégradation de la couverture végétale avec une tendance négative toutefois non significative au seuil de 10%.

Pour ce qui est des zones de régénération, elles concernent le long de la partie sud de la Haute-Casamance. Elles concernent 9,3 % des changements, dont 5,2 % correspondent à la progression de la savane sur les zones de culture et d'habitat. En effet, laissées en jachère pendant une longue période, les surfaces agricoles ont tendance à retrouver leur situation initiale. Toutefois, elle se fait par une transition avec le passage des zones de culture à la savane (arborée, puis arbustive puis boisée), puis de la savane à la forêt. D'ailleurs, 20 410 ha sont concernés par cette situation. Quant à la conversion de la savane en forêt, la situation est beaucoup plus marquée dans la partie sud-Ouest de la zone d'étude, entre les communes de Dioulacolon, Médina El Hadji et de Tankanto Escale (16). Des surfaces situées dans l'extrémité Est (sur l'axe Linkering-Guinée) (17) et entre Linkering-Paroumba (18), au centre (au nord de Médina Cherif) (19), et au nord-Ouest de Thiétty (à l'extrémité Ouest de la région) (20) sont également concernées. Une tendance positive à l'augmentation du NDVI y est notée. La conversion de la savane en forêt porte sur 36 306 ha.

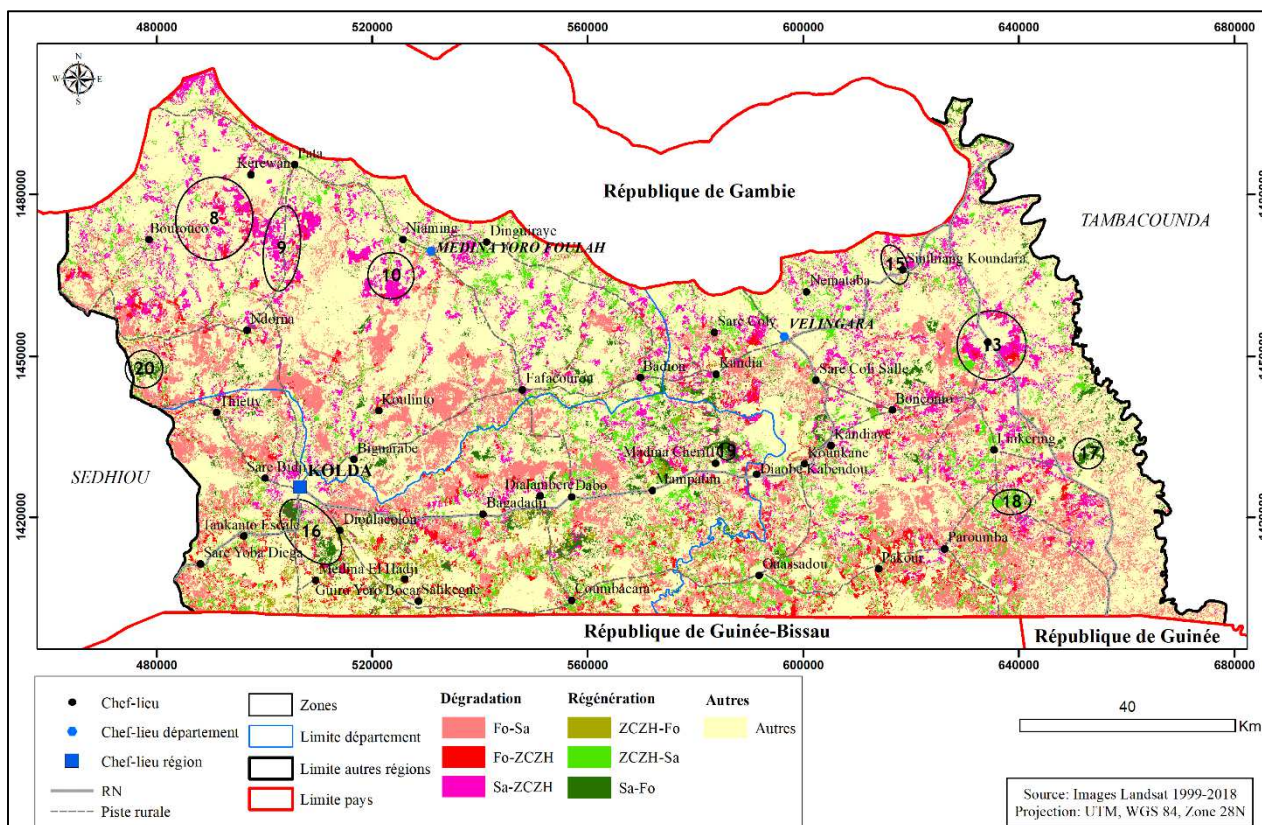


Figure 9 : Changements de l'occupation du sol entre 1999-2018 en Haute-Casamance (à partir de l'image Landsat).

Changements		ha	%
Dégradation	Forêt-Savane	185 845	13,5
	Forêt-Zones de culture et d'habitat	46 439	3,4
	Savane- Zones de culture et d'habitat	108 586	7,9
Régénération	Zones de culture et d'habitat -Forêt	20 410	1,5
	Zones de culture et d'habitat -Savane	72 220	5,2
	Savane-Forêt	36 306	2,6
Autres	Autres	907 289	65,9
Total		1 377 095	100

Tableau 3 : Bilan des changements de la couverture végétale entre 1999-2018 (en hectare et en pourcentage).

4.3. Tendence NDVI et Changements de la couverture végétale entre 1999 et 2018

Pour voir la cohérence entre les zones de changement de la couverture végétale et les zones de tendances significatives et non significatives détectées, nous avons additionné le NDVI et le LULCC. Le résultat de cette

addition indique plusieurs zones de concordance de la dégradation et de la régénération de la végétation (cf. Figure 10). Pour la dégradation, les zones de dégradation significative sont : le sud de Kerewan (zone 8) et de Niaming (10), l'axe Ndorna-Pata (9), autour de Médina Gounass (13), et au nord vers Saré Coly (14).

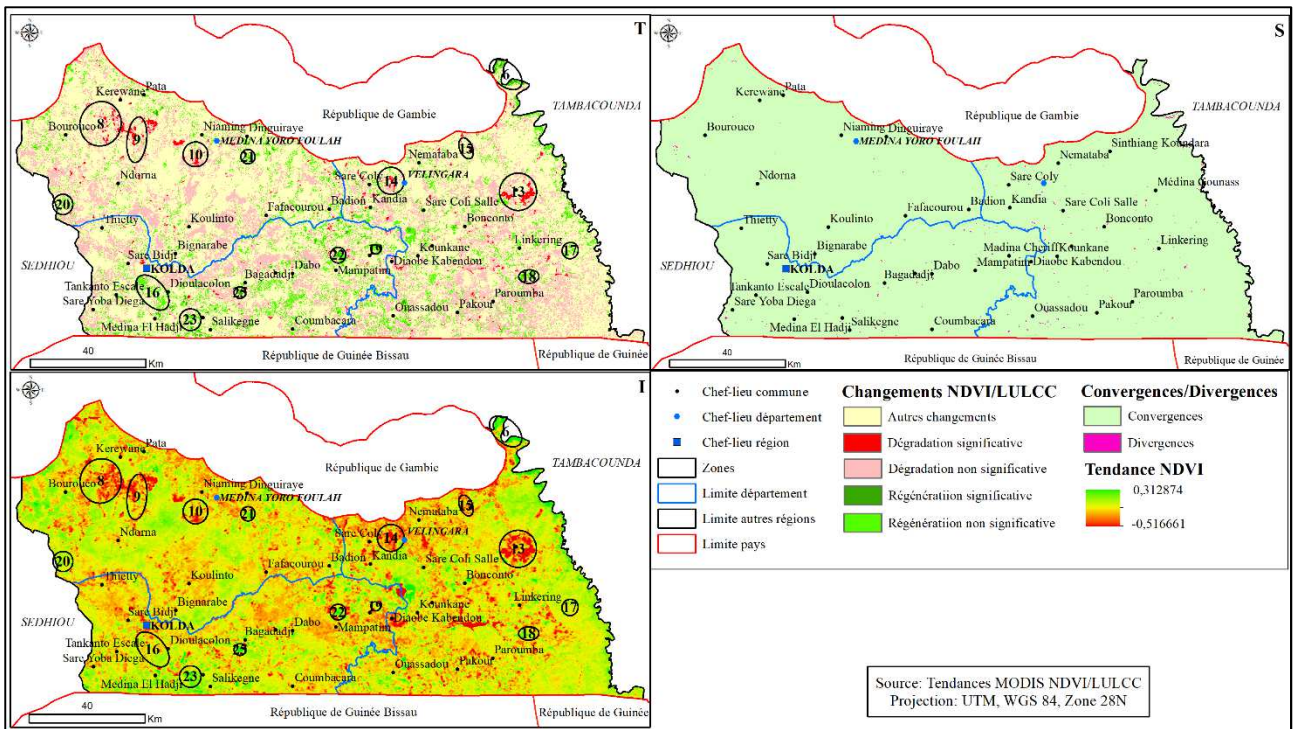


Figure 10 : Changements entre le NDVI/LULCC entre 1999-2018 en Haute-Casamance (T), Convergence/Divergence entre le NDVI/LULCC (S), Tendance NDVI (I).

Pour la régénération, les zones de tendances significatives se trouvent principalement : dans le nord vers Médina Yoro Foulah (zone 21) et à l'extrémité nord-est (6) dans la zone de Sinthiang Koundara, au nord de Mampatim (22), au sud vers Bagadadji (25) et Médina El Hadji (23), et entre Linkering-Paroumba (18).

Cette concordance des changements entre les deux jeux de données représente 99,76% de la zone d'étude. Ce qui indique également la qualité et la complémentarité des deux jeux de données pour détecter les changements de la couverture végétale.

Toutefois, des pixels représentant une divergence sont notés de manière dispersée. Ils représentent 0,24%. Ces divergences pourraient être liées au rééchantillonnage de la carte des changements d'occupation des sols issue de l'image Landsat à la résolution de 250m.

5. Discussion

Le couvert végétal a connu d'importantes modifications durant ces deux dernières décennies en Haute-Casamance. Les tendances positives du NDVI observées à travers la corrélation de Mann-Kendall témoignent de la stabilité de la couverture végétale et de sa régénération par endroit. Alors que les tendances négatives démontrent à suffisance la dégradation de la couverture végétale. En effet, les zones présentant des tendances positives et négatives du NDVI coïncident bien avec les zones d'augmentation ou de diminution de

la végétation observées sur la carte des changements d'occupation des sols sur la période 1999-2018.

Les résultats de cette étude sont en accord avec ceux obtenus dans des études similaires au Sénégal d'une manière générale, et en Haute-Casamance en particulier. En Casamance, Neeti et Eastman (2011) notent une tendance négative entre 1982 et 2003. Selon Li et al. (2004), cette tendance est difficile à expliquer. En termes de changements d'occupation du sol, Solly et al., (2020 b) ont montré une conversion importante de la végétation naturelle en zone de culture entre 1987 et 2018 en Haute-Casamance. Ils mentionnent trois grandes modifications suivant un gradient nord-sud : de la déforestation par progression des surfaces agricoles et sols sur le long de la frontière avec la Gambie, une savanisation et une anthropisation sur le long de la partie centre, et une stabilité des surfaces forestières accompagnée d'une timide savanisation et anthropisation dans le sud. Toutefois, ils ont noté une reforestation de 60 923 ha dont 34 109 ha sur les surfaces de savane. Pour ce qui est de la tendance à la progression de la savane, elle n'épargne pas la Basse et la Moyenne Casamance selon Diédhiou (2019).

Les résultats de cette étude semblent également montrer que les actions de l'homme sont des facteurs de dégradation importants. Ces dernières expliquent, à travers les défrichements agricoles, la dégradation de la couverture végétale sur le long de la frontière avec la Gambie ainsi que dans le centre de la zone d'étude. Ils

sont consécutifs à l'augmentation des besoins en alimentation, et sont fortement conditionnés par la pression démographique. Le long de la frontière avec la Gambie, les défrichements sont liés à l'arrivée massive d'agropasteurs venant du Bassin Arachidier et du Sénégal Oriental de la fin des années 1970 jusqu'au début des années 2000 à la recherche de nouvelles terres agricoles (Sidibé, 2005 ; Fanchette, 1999). Ce besoin en terres de culture explique les tendances négatives du NDVI le long de la frontière et sur l'axe Pata-Ndorna, ainsi que la dégradation de la couverture végétale. Dans le sud, les défrichements sont liés à l'arrivée de migrants venant de la Guinée Bissau et de la République de Guinée, attirés par les vastes surfaces disponibles et l'activité commerciale de la région (Pelissier, 1966). Dans le centre de la zone d'étude, une part importante des défrichements est liée à l'aménagement hydroagricole de la vallée de l'Anambé, par la Société de Développement Agricole (SODAGRI) depuis 1978. C'est ainsi que, portés sur de vastes étendues, les défrichements ont entraîné une perte importante de la couverture végétale, au point que les surfaces agricoles occupent 31 % de la superficie totale de la zone d'étude en 2018. Des années 1970 au début des années 2000, les défrichements émanaient des fronts pionniers, mais, depuis quelques années, les formes de défrichement les plus courantes sont de type abattis en raison de l'interdiction des défrichements par le code forestier et des problèmes fonciers (Solly et al., 2020a). Cette forme de défrichement est à l'image de celle pratiquée en Guyane française (Tsayem Demaze, 2002). Bien que touchant initialement de petites surfaces, les abattis se multiplient de manière spontanée et non planifiée. L'augmentation de la population accroît également la demande en combustibles ligneux et donc la coupe abusive et illicite de certaines espèces ligneuses pour la vente. À cela s'ajoutent les feux de brousse qui sont d'ailleurs considérés par beaucoup d'auteurs comme un facteur important de la progression des savanes (Aubreville, 1949 ; Jacquin, 2010) et de la dégradation de la végétation (Mbow, 2000). Selon Chave (2000), ils sont l'une des causes principales de la relative lenteur de la progression forestière au Sénégal.

Cette étude permet également de constater que l'analyse combinée des tendances de séries temporelles d'images MODIS NDVI à la cartographie des changements d'occupation des sols permet de mieux appréhender la dégradation et la régénération de la couverture végétale. L'analyse croisée de ces données a permis de confirmer les zones de dégradation et de régénération de la couverture végétale dans la zone d'étude. Elle a donné plus de détails sur la significativité des changements qui n'ont pu être obtenus à partir de l'une ou l'autre analyse.

Cette étude est intéressante dans la mesure où elle apporte de nouvelles connaissances aux décideurs par rapport à l'existant sur la dynamique de la couverture

végétale en Haute-Casamance. Elle permet de localiser avec plus de précision les zones de dégradation et de régénération de la couverture végétale, et de préciser quels en sont les principaux déterminants, ce qui est nécessaire pour l'élaboration de politiques efficaces de sauvegarde des forêts. De plus, elle est une contribution dans la cartographie de la dégradation et de la régénération de la couverture végétale dans le monde d'une manière générale, et à l'atteinte de l'objectif 15 des Objectifs du Développement Durable.

6. Conclusion

Les changements de la couverture terrestre sont souvent utilisés comme indicateurs de dégradation ou de régénération des terres. Cependant, il convient d'interpréter les résultats avec précaution en identifiant l'emplacement, la quantité des changements, ainsi que les causes de ces changements (Veldkamp et Lambin, 2001 ; Yengoh et al., 2015). C'est ce qui a été fait dans cette étude grâce à l'utilisation conjointe d'une série temporelle d'images MODIS NDVI acquises sur la période 2000-2018 et d'images Landsat acquises en 1999 et 2018.

Cette étude a permis de détecter et de cartographier la dégradation et la régénération de la couverture végétale en Haute-Casamance durant ces deux dernières décennies. Elle a révélé d'importantes conversions de la végétation et des tendances à la baisse et à l'augmentation du NDVI. Ces tendances observées par MODIS sont expliquées en grande partie par les conversions d'usage des terres, et non par le climat. Le pourcentage de tendance positive significative (au seuil de 10 %) est de 1,8 % ; celle négative significative est de 2,1 %. Les zones de tendances positives reflètent en termes de changements de couverture terrestre, la stabilité et la régénération de la couverture végétale, tandis que les tendances négatives, observées principalement le long de la frontière avec la Gambie, sur l'axe Pata-Ndorna, au tour de Médina Gounass, et dans le centre-est de la zone d'étude, reflètent la dégradation.

Les deux approches utilisées dans cette étude donnent des résultats cohérents. La méthode utilisée peut contribuer à une surveillance plus efficace des changements de la couverture végétale et à une gestion environnementale durable.

Références

- ANAT. (2018) Plan national d'aménagement et de développement territorial (PNADT) horizon 2035. Version Provisoire. Édit. Agence Nationale d'Aménagement du Territoire, Dakar (Sénégal), 277 p.
- ANSD. (2017) Recensement général de la population et de l'habitat, de l'agriculture et de l'élevage de 2013. Rapport définitif région de Kolda, Édit. Agence

- Nationale de la Statistique et de la Démographie, Dakar (Sénégal), 90 p.
- Andrieu, J. (2018) Analyse de la cinématique de la végétation en Côte d'Ivoire pendant les conflits à travers une métrique phénologique et la corrélation de Kendall de deux séries temporelles de NDVI. *Tropicicultura*, vol. 36, n° 2, p. 258-270.
- Andrieu, J. et Mering, C. (2008) Cartographie par télédétection des changements de la couverture végétale sur la bande littorale Ouest-africaine : exemple des rivières du sud du delta du Saloum (Sénégal) au rio Gêba (Guinée-Bissau). *Télédétection*, vol 8, n° 2, p. 93-118.
- Aubreville, A. (1957) Accord de Yangambi sur la nomenclature des types africains de végétation, *Revue Bois et Forêts des Tropiques*, n 51, p. 23-27.
- Aubreville, A. (1949) Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Édit. Société d'éditions géographiques, maritimes et coloniales, Paris, 351 p.
- Bodian, A. (2014) Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest). *Physio-Géo*, vol 8, p. 297-312.
- Budde, M. E. Tappan, G. Rowland, J. Lewis, J. and Tieszen, L. L. (2004) Assessing land cover performance in Senegal, West Africa using 1-km integrated NDVI and local variance analysis. *Journal of Arid Environments*, vol 59, p. 481-498.
- Chave, J. (2000) Dynamique spatio-temporelle de la forêt tropicale. *Annales de Physique*, 25, 184 p.
- CILSS. (2016) Les Paysages de l'Afrique de l'Ouest : Une Fenêtre sur un Monde en Pleine Évolution. U.S. Geological Survey EROS, 47914 252nd St, Garretson, SD 57030, UNITED STATES, 219 p.
- Diédhiou, I. (2019) Entre utilisation et préservation des ressources ligneuses en Afrique de l'Ouest : Dynamique des paysages forestiers en Sénégal méridionale. Thèse de Doctorat en cotutelle de l'Université de Paris et Université Assane Seck de Ziguinchor, Sénégal, 444 p.
- Diéye, E. H. B. Diaw, A. T. Sané, T. et Ndour, N. (2013) Dynamique de la mangrove de l'estuaire du Saloum (Sénégal) entre 1972 et 2010. *European Journal of Geography*, 629, p. 1-27.
- Dione A., Sarr O., Ngom S., Diallo A., et Guisse A., (2020) Perceptions pastorales des ligneux fourragers par les agropasteurs et les transhumants au centre du Sénégal. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* Vol 14, p. 772-787
- Diouf, A. and Lambin, E. (2001) Monitoring land-cover changes in semi-arid regions : remote sensing data and field observations in the Ferlo, Senegal. *Journal of Arid Environments*, vol 48, p. 129-148.
- Eckert, S. Husler, F. Liniger, H. and Hodel, E. (2015) Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia, *Journal of Arid Environments*, vol 113, p. 16-28.
- Fanchette, S. (1999) Colonisation des terres sylvo-pastorales et conflits fonciers en Haute-Casamance. IIED, Coll. Tenures foncières pastorales, n° 13, Londres, 41 p.
- Fensholt, R. (2004) Earth observation of vegetation status in the Sahelian and Sudanian West Africa : comparison of Terra MODIS and NOAA AVHRR satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, vol 25, p. 1641-1659.
- FAO. (2015) Evaluation des ressources forestières mondiale 2015. Répertoire de données de FRA. 2015, Rome, Italie, 244 p.
- Jacquin, A. (2010) Dynamique de la végétation des savanes en lien avec l'usage des feux à Madagascar. Analyse par série temporelle d'images de télédétection. Thèse de Doctorat en Fonctionnement des écosystèmes et agrosystèmes, Université de Toulouse, 144 p.
- Guo, M. Li, J. He, H. Xu, J. and Jin, H. (2018) Detecting Global Vegetation Changes Using Mann-Kendal (MK) Trend Test for 1982-2015 Time Period. *China Geography Science*. Vol 28, p. 907-919.
- Herrmann, S. M. Anyamba, A. and Tucker, C. J. (2005) Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environ. Change*, vol 15, p. 394-404.
- Hmimina, G. Dufrêne, E. Pontailier, J.-Y. Delpierre, N. Aubinet, M. Caquet, B. and Soudani, K. (2013) Evaluation of the potential of MODIS satellite data to predict vegetation phenology in different biomes: An investigation using ground-based NDVI measurements. *Remote sensing of environment*, 132, 145-158.
- Leroux, L. Bégue, A. Lo Seen, D. Jolivot, A. and Kayitakire, F. (2017) Driving forces of recent vegetation changes in the Sahel: lessons learned from regional and local level analyses. *Remote Sensing of Environment*, 191, p. 38-54.
- Li, J. Lewis, J. Rowland, J. Tappan, G. and Tieszen, L. L. (2004) Evaluation of land performance in Senegal using multi-temporal NDVI and rainfall series. *Journal of Arid Environments*, vol 59, p. 463-480.
- Mbow, C. (2000) Caractéristiques spatio-temporelles des feux de brousse et de leur relation avec la végétation dans le Parc National de Niokolo Koba (Sud-Est du Sénégal). Thèse de Doctorat de 3e Cycle de l'Institut des Sciences de l'Environnement, Dakar, 120 p.
- Michel, P. (1990) La dégradation des paysages au Sénégal. pp 37-53. In *La dégradation des paysages en Afrique de l'Ouest*, J-F Richard. (eds). Séminaire de Dakar, 21-26 novembre 1988, 310 p.
- Montfort, F. Bégue, A. Leroux, L. Blanc, L. Gond, V. Cambule, A. H. Remane, I. A. D. and Grinand, G. (2020) From land productivity trends to land degradation assessment in Mozambique: Effects of climate, human activities and stakeholder definitions. *Land Degradation & Development*, 17p.
- Neeti, N. and Eastman, J. R. (2011) A Contextual Mann-Kendall Approach for the Assessment of Trend Significance in Image Time Series. *Transactions in GIS*, vol 15, p. 599-611.
- Nicholson, S. E. Davenport, M. L. and Malo, A. R. (1990) A comparison of the vegetation response to rainfall in the Sahel and East Africa using normalized difference vegetation index from NOAA AVHRR. *Climatic Change*, vol 17, p. 209-241.
- Noël Gansaonré, R. Zoungrana, B.J.-B. and Isidore Yanogo, P. (2020) Dynamique du couvert végétal à la périphérie du Parc W du Burkina Faso. *Belgeo*, vol 1, p. 1-23.

- Pelissier, P. (1966) Les paysans du Sénégal : les civilisations du Cayor à la Casamance. Ed. Saint Yrieux, Imprimerie Fabrègue, 954 p.
- Safriel, U. N. (2007) The assessment of global trends in land degradation. In: Sivakumar MK, Ndiang'ui N (eds) Climate and land degradation, Environmental science and engineering: environmental science. Springer, Berlin, p. 1–38.
- Sagna, P. (2005) Dynamique du climat et son évolution récente dans la partie Ouest de l'Afrique occidentale. Thèse de Doctorat d'État Es Lettres, Département de Géographie, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Tome 1, 270 p.
- San Emeterio, J-L. Lacaze, B. and Mering, C. (2011) Détection des changements de la couverture végétale au Sahel durant la période 1982-2002 à partir des données NDVI et précipitation. *Téledétection*, vol 10, p. 135-143.
- Sidibe, M. (2005) Migrants de l'arachide. La conquête de la forêt classée de Pata. Casamance, Sénégal. IRD Editions, Paris, 301 p.
- Solly, B. Dieye, E. H. B. Mballo, I. Sy, O. Sané, T. et Thior, M. (2020a) Dynamique spatio-temporelle des paysages forestiers dans le sud du Sénégal : cas du département de Vélingara. *Physio-Géo*, vol 15, p. 41-67.
- Solly, B. Dieye, E. B. D. and Sy, O. (2020b) Remote Sensing Mapping of Land Use and Land Cover Changes in Upper Casamance, Senegal, 1987-2018. *American Journal of Remote Sensing*. vol 8, p. 35-49.
- Solly, B. Andrieu, J. Diéye, E.H.B. and Jarju, A.M. (2021). Analyse des changements de la couverture végétale au Sénégal à l'aide de séries temporelles MODIS NDVI. *Vertigo*, sous presse.
- Stancioff, A. Staljanssens, M. et Tappan, G. (1986) Cartographie et télédétection des ressources de la république du Sénégal. Etude de la géologie, de l'hydrogéologie, des sols, de la végétation et des potentiels d'utilisation des sols. Remote Sensing Institute, SDSU-RSI-86-01, 653 p.
- Sylla, D. Ba, T. et Guisse, A. (2019) Cartographie des changements de la couverture végétale dans les aires protégées du Ferlo (nord Sénégal) : cas de la réserve de biosphère. *Physio-Géo*, vol 13, p. 115-132.
- Tappan, G. G. Sall, M. Wood, E. C. and Cushing, M. (2004) Ecoregions and land cover trends in Senegal. *Journal of arid Environnements*, vol 59, p. 427-462.
- Teferi, E. Uhlenbrook, S. and Bewket, W. 2015. Inter-annual and seasonal trends of vegetation condition in the Upper Blue Nile (Abay) Basin: dual-scale time series analysis. *Earth Syst. Dynam.*, 6, 617–636.
- Tsayem Demaze, M. (2002) Caractérisation et suivi de la déforestation en milieu tropical par télédétection : application aux défrichements agricoles en Guyane française et au Brésil. Thèse de l'Université d'Orléans, 242 p.
- Veldkamp, A. and Lambin, E. F. (2001) Predicting land-use change. *Agriculture, ecosystems & environment*, vol 85, p. 1-6.
- Wessels, K. J. Bergh, F. V. D. and Scholes, R. J. (2012) Limits to detectability of land degradation by trend analysis of vegetation index data. *Remote sensing of environment*, vol 125, p. 10-22.
- Yengoh, G.T. Dent, D. Olsson, L. Tengberg, A.E. and Tucker III C. J. (2015) Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales Current Status, Future Trends, and Practical Considerations. SpringerBriefs in Environmental Science, 110 p.
- Zewdie, W. Csaplovics, E. and Inostroza, L. (2017) Monitoring ecosystem dynamics in northwestern Ethiopia using NDVI and climate variables to assess long term trends in dryland vegetation variability. *Applied Geography*, 79, p. 167–178.
- Zougrana, B. J-B. Conrad, C. Thiel, M. Amekudzi, L. K. and Da, E. D. (2018) MODIS NDVI trends and fractional land cover change for improved assessments of vegetation degradation in Burkina Faso, West Africa. *Journal of Arid Environments*, vol 153, p. 66-75.

LEGENDES EN ANGLAIS

Figure 1: Location of the study area in southern Senegal.

Figure 2: Evolution in annual precipitation between 2000 and 2018 (average at Kolda, Vélingara, Medina Yoro Foulah, Dabo, Bonconto and Kounkané) (source: ANACIM).

Figure 3: Scenes p204-r051 (left) and p203-r051 (right) of the Landsat image.

Figure 4: Zoom on the land use classes identified from the Landsat OLI_TIRS 2018 image, their thematic correspondence in the field and the geographic coordinates of the photos in UTM Zone 28N.

Figure 5: Image before and after smoothing from Idrisi TerrSet software.

Figure 6: Mask of thematic classes resulting from the grouping of the first classification of the Landsat image OLI_TIRS 2018.

Figure 7: (a) NDVI trends between 2000 and 2018 in Haute-Casamance ; (b) Significance at the 10% level.

Figure 8: Land Use in 1999 (a) and 2018 (b).

Figure 9: Changes in land cover between 1999-2018 in Upper Casamance (from the Landsat image).

Figure 10: Changes between NDVI / LULCC between 1999-2018 in Haute-Casamance (T), Convergence / Divergence between NDVI / LULCC (S), Trend NDVI (I).

Table 1: Landsat images used.

Table 2: Codes and changes in studied land cover classes

Table 3: Assessment of changes in vegetation cover between 1999-2018 (in hectare and percentage)