

Dynamiques contrastées de reverdissement et dégradation de la couverture végétale au Sénégal révélées par analyse de série temporelle du NDVI MODIS

Boubacar Solly, Julien Andrieu, El Hadji Balla Dieye et Aruna M Jarju

Volume 22, numéro 1, avril 2022

Varia

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/1092284ar>
DOI : <https://doi.org/10.4000/vertigo.35589>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec à Montréal
Éditions en environnement VertigO

ISSN

1492-8442 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Solly, B., Andrieu, J., Dieye, E. H. B. & Jarju, A. M. (2022). Dynamiques contrastées de reverdissement et dégradation de la couverture végétale au Sénégal révélées par analyse de série temporelle du NDVI MODIS. *VertigO*, 22(1), 1–24. <https://doi.org/10.4000/vertigo.35589>

Résumé de l'article

Cette étude cherche à analyser les changements de la couverture végétale dans les écorégions du Sénégal durant ces deux dernières décennies (2000 à 2019) à l'aide d'une série temporelle d'images MODIS *Normalized difference vegetation index* (MODIS NDVI) de 16 jours et d'une résolution spatiale de 250 mètres. La méthode de l'étude est une combinaison de la télédétection et de la statistique. Le traitement des données a obéi à trois principales étapes : l'Analyse en composantes principales (ACP) sur la série temporelle 2000-2019 suivie de la classification non supervisée en utilisant le résultat de l'ACP ; le calcul du NDVI moyen des 23 périodes de 16 jours ; le calcul de la corrélation ou « tau » (τ) de Kendall associé au test de significativité de $p \leq 0,1$. Les résultats indiquent des modifications dans l'évolution du rythme phénologique des classes correspondant aux cultures de bas-fond, aux vallées inondables, à la mangrove, à la forêt dense, et à la savane arborée et boisée. Certaines modifications sont assimilables à une dégradation, et d'autre à un reverdissement. De même, il a été constaté un décalage temporel et une saison verte plus tardive. En effet, la corrélation de Kendall a indiqué une augmentation du NDVI entre 2000-2009 principalement dans les écorégions de l'est du pays, du sud-ouest et de la zone des estuaires avec une tendance significative. Durant la décennie 2010-2019, un ensemble de petites zones de progression a été noté. Par contre, les valeurs de corrélations négatives de NDVI, qui dénotent une diminution de l'activité végétative, s'observent principalement dans les écorégions du nord et du centre-ouest du pays avec une tendance toutefois non significative.



Dynamiques contrastées de reverdissement et dégradation de la couverture végétale au Sénégal révélées par analyse de série temporelle du NDVI MODIS

Boubacar Solly, Julien Andrieu, El Hadji Balla Dieye et Aruna M Jarju

Introduction

- 1 Le suivi des changements de la couverture végétale constitue un intérêt majeur pour une meilleure gestion des ressources et de l'environnement. En Afrique de l'Ouest, particulièrement au Sénégal, ce suivi s'inscrit dans un contexte général de variabilité pluviométrique (Bodian, 2014 ; Descroix et *al.*, 2015 ; Cissé, 2016 ; Nouaceur, 2020) et de dégradation des terres depuis plus de quatre décennies (Michel, 1990 ; Budde et *al.*, 2004 ; Li et *al.*, 2004 ; Hountoudji, 2008 ; CILSS, 2016). Ce suivi prend une dimension particulièrement intéressante à travers l'identification, la description et l'analyse du processus en cours (dégradation/reverdissement).
- 2 À l'échelle des zones géographiques (Stancioff et *al.*, 1986) ou écorégions¹ (Tappan et *al.*, 2004), l'utilisation des images à haute résolution spatiale telles que Corona, Landsat et Spot ont permis de montrer certaines tendances comme la déforestation, la savanisation, l'anthropisation, la fragmentation, ou même à l'inverse la régénération de l'environnement (Andrieu et *al.*, 2018 ; Sylla et *al.*, 2019 ; Diédhiou, 2019 ; Solly et *al.*, 2021a).
- 3 À l'échelle nationale ou régionale, l'utilisation des séries temporelles d'images NOAA AVHRR et MODIS s'est également révélée efficace dans l'analyse des modifications et des tendances de la couverture végétale à grande échelle en Afrique de l'Ouest d'une manière générale (Herrmann et *al.*, 2005 ; Hountoudji, 2008 ; Neeti et Eastman, 2011 ;

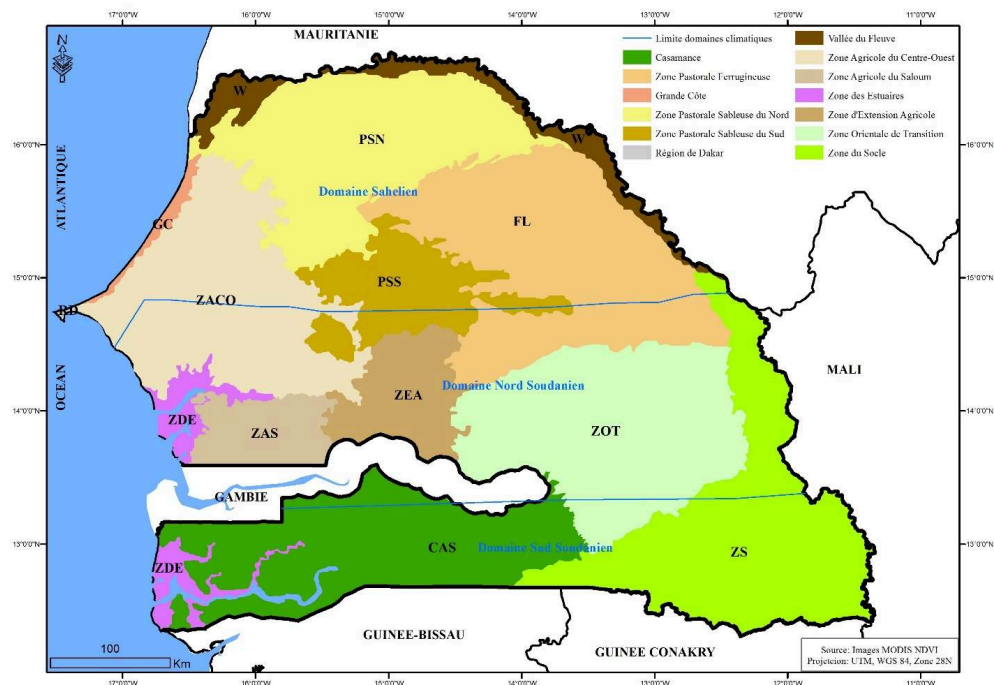
San Emeterio et al., 2011 ; Andrieu, 2018 ; Zoungrana et al., 2018), et au Sénégal en particulier (Budde et al., 2004 ; Fensholt, 2004 ; Li et al., 2004). Elles fournissent les données appropriées pour analyser la tendance des changements liés aux phénomènes naturels et humains (Hmimina et al., 2013), et pour identifier la dégradation et la régénération des terres (Eckert et al., 2015). Pour ce faire, l'indice le plus couramment utilisé de ces séries est l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI). Il fournit des informations sur l'activité photosynthétique, la productivité primaire et la biomasse donc indirectement sur la teneur en eau des feuilles, l'humidité des sols ou la qualité phytosanitaire. Il permet de détecter, par des changements de productivité de la végétation, des changements de couvert forestier (Guo et al., 2018). Des différences ou des modifications de types d'espèces, la présence de végétation perturbée dans une zone présentant un type de végétation similaire, voire des variations de conditions climatiques, et les facteurs d'évolution peuvent se refléter à travers le NDVI (Yengoh et al., 2015).

- 4 Parmi les facteurs de transformation du couvert, il faut noter que la variabilité climatique est couramment indexée comme étant la principale cause de changement en Afrique de l'Ouest (Herrmann et al., 2005). Elle conditionne la zonation du couvert végétal et la quantité de biomasses végétales. D'ailleurs, le NDVI reste fortement corrélé à la pluviométrie dans de nombreux pays d'Afrique de l'Ouest (Nicholson et al., 1990 ; Li et al., 2004 ; San Emeterio et al., 2011). Le rôle de la pluviométrie dans les modifications de la couverture végétale a été plusieurs fois démontré (Hountoudji, 2008 ; Philippon et al., 2008 ; Cissé, 2016). En effet, une corrélation linéaire est généralement notée dans les zones qui enregistrent moins de 1000 millimètres par an (Nicholson et al., 1990 ; Djoufack-Manetsa et al., 2012). Li et al. (2004) estiment qu'elle est généralement faible dans les zones qui enregistrent des précipitations annuelles de plus de 700-800 millimètres. Au-delà de ce seuil, l'eau n'est plus un facteur limitant le développement du couvert végétal, car cette relation devient logarithmique à cause de l'effet de saturation de la réponse de la végétation (Fensholt, 2004 ; San Emeterio et al., 2011). Or, une variabilité pluviométrique avec des valeurs supérieures et inférieures à ces seuils est couramment enregistrée du nord au sud du Sénégal avant, pendant et après la période sèche des années 1970-1980 (Bodian, 2014 ; Nouaceur, 2020).
- 5 En plus de la variabilité des conditions pluviométriques, il est à noter que dans tous les pays d'Afrique de l'Ouest, l'agriculture exerce une forte pression sur les paysages naturels, remplaçant et fragmentant les savanes, les forêts claires et les forêts denses (Ariori et Ozer 2005 ; CILSS, 2016 ; Zoungrana et al., 2018). Au Sénégal, les terres cultivées sont passées de 32 600 kilomètres carrés en 1975 à 32 900 kilomètres carrés en 2000 et 41 000 kilomètres carrés en 2013, soit une extension de 8 100 kilomètres carrés depuis le début de la dernière décennie (CILSS, 2016).
- 6 Cette étude se propose de déterminer les changements de la couverture végétale au Sénégal durant les deux dernières décennies, et plus particulièrement au sein des écorégions, à travers l'utilisation de séries temporelles d'images MODIS NDVI allant de 2000 à 2019. Les objectifs spécifiques sont premièrement de déterminer l'état de la couverture végétale entre 2000-2019 et les changements du rythme phénologique de la végétation durant les deux décennies, puis de détecter les différentes tendances de la productivité de la végétation.

Zone d'étude

- 7 Le Sénégal se trouve dans la zone ouest-africaine entre 12,8° et 16,09° de latitude nord, et 12° et 17° de longitude ouest. Il est subdivisé en 15 écorégions (Tappan *et al.*, 2004), toutes étudiées (figure 1).

Figure 1. Localisation de la zone d'étude selon les écorégions et les domaines climatiques. Figure 1. Location of study area by ecoregions and climate domains.



- 8 L'occupation des sols peut être regroupée en 13 classes : les surfaces agricoles (irriguée, inondation récessive, jardin, pluviale), les plans d'eau, les surfaces sableuses, les terrains rocheux, les sols dénudés, les habitations, les steppes, les savanes (savanes boisées et boisés ouverts), les galeries forestières et forêts, les prairies marécageuses et vallées inondables, les oasis du désert ainsi que les mangroves et les plantations.
- 9 Du point de vue climatique, le pays est subdivisé en trois domaines que sont le domaine sahélien, le domaine nord-soudanien et le domaine sud-soudanien (Sagna, 2005). L'année se caractérise par deux saisons. Il s'agit de la saison sèche qui va de décembre à mai, et de la saison des pluies qui va généralement de juin à novembre. La vallée du fleuve (W), la grande côte (GC), et les zones pastorales appartiennent globalement au domaine sahélien. Dans ce domaine, les précipitations varient entre 100 et 500 millimètres par an. Dans les zones pastorales, principalement au sein de la région du Ferlo, l'étude note une dégradation du couvert végétal qui semble liée à la sédentarisation de populations jadis transhumantes et aux conditions naturelles (Sylla *et al.*, 2019).
- 10 Dans la zone agricole du centre-ouest (ZACO) et dans la zone agricole du Saloum (ZAS), une forte présence humaine, qui a modifié les paysages boisés d'origine, a été notée (CILSS, 2016). Ces deux écorégions, en plus de la zone d'extension agricole (ZEA) et la zone orientale de transition (ZOT), appartiennent globalement au domaine nord-

soudanien. Dans ce domaine, les précipitations annuelles oscillent entre 500 et 1000 millimètres.

- 11 La zone sud-soudanienne concerne globalement la région de la Casamance (CAS) et la zone du socle (ZS). Ce domaine enregistre des précipitations qui varient globalement entre 1000 et 1500 millimètres par an. Ces deux écorégions et la zone orientale de transition couvrent les plus grandes et denses superficies forestières et boisées du Sénégal (Stancioff et al., 1986 ; Tappan et al., 2004) et sont soumises à une forte exploitation des ressources (Diédhiou, 2019 ; Solly et al., 2020).
- 12 La zone des estuaires (ZDE) ou zone de mangrove se trouve à la fois dans le domaine nord soudanien, dans le delta du Saloum, et sud soudanien, dans l'estuaire de la Casamance. Elle se caractérise depuis le début de la décennie 2000 par un processus d'importante régénération naturelle et assistée, après une période de régression des formations de mangrove liée aux épisodes majeurs de sécheresse des années 1970-1980 (Diéye et al., 2013 ; Andrieu et al., 2018). Des conditions humides ont cependant été notées depuis 1999, même si les précipitations annuelles restent inférieures à celles d'avant 1970 (Bodian, 2014). La tendance à des conditions plus humides se manifeste en revanche à partir de 2008 (Nouaceur, 2020).

Données et méthode

Données utilisées

- 13 Les données MODIS NDVI sont plus couramment utilisées pour étudier les modifications de la couverture végétale à grande échelle à partir d'une série temporelle à haute répétitivité durant les deux dernières décennies (Jacquin et al., 2010 ; Eckert et al., 2015 ; Mishra et al., 2015 ; Teferi et al., 2015 ; Mishra et Mainali, 2017 ; Zewdie et al., 2017 ; Zoungrana et al., 2018). Comparées aux données NOAA AVHRR², elles ont montré leur performance pour une telle étude au Sénégal (Fensholt, 2004).
- 14 Les images utilisées sont celles du satellite MODIS³ fournies sur un pas de temps de 16 jours avec une résolution spatiale de 250 mètres. Cette résolution efface les microstructures, mais révèle des structures locales et régionales (Andrieu, 2018). La série temporelle utilisée s'étend de 2000 à 2019. Les produits sont fournis au format HDF-EOS (Hierarchical Data Format for NASA's Earth Observing System), et sont composés de deux indices de végétation : le NDVI et l'Indice de végétation amélioré (EVI). Comparé au NDVI, l'EVI a une sensibilité améliorée dans les régions à forte biomasse. Ainsi, étant donné que le Sénégal se caractérise par un gradient prononcé de la densité de la végétation du nord au sud (zone aride à humide), nous avons jugé nécessaire d'utiliser le NDVI. Cet indice s'est également révélé efficace pour une telle étude au sein d'autres pays du Sahel (Leroux et al., 2014 ; Dardel et al., 2014 ; Brandl et al., 2016). Les images fournies ne mesurent pas le stade phénologique des végétaux, mais donnent une estimation de l'activité végétative, laquelle varie avec les saisons. Leur utilisation a nécessité de procéder à un certain nombre de traitements.

Chaîne de traitement

- 15 Il existe plusieurs approches pour étudier l'évolution et les modifications de la couverture végétale à partir du NDVI. D'aucuns ont intégré à l'analyse du

comportement phénologique, l'analyse des tendances à travers le test contextuel de Mann-Kendall (Neeti et Eastman, 2011 ; Zewdie et al., 2017), 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). D'autres sont allés plus loin en confrontant l'analyse aux variations des données de précipitations et de températures (Li et al., 2004 ; Hountoudji, 2008 ; Philippon et al., 2008 ; San Emeterio et al., 2011 ; Djoufack-Manetsa et al., 2012 ; Mishra et al., 2015) et aux cartes d'occupation et d'utilisation des sols (Budde et al., 2004 ; Zoungrana et al., 2018 ; Marega et al., 2021 ; Solly et al., 2021a). Il n'existe cependant pas encore de consensus à propos de la méthode la plus efficace pour effectuer une telle étude (San Emeterio et al., 2011).

- 16 Cette recherche intègre pour sa part la corrélation de Kendall à l'analyse du rythme phénologique de l'activité végétale. Cette approche permet de détecter les tendances dans une série chronologique. Deux paramètres sont alors considérés, il s'agit du coefficient de corrélation « tau » et de 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). Tandis que, la valeur de signification met en évidence la significativité de la tendance (Neeti et Eastman, 2011 ; Zoungrana et al., 2018) en ce qu'elle représente la mesure de la nécessité de rejeter une hypothèse nulle ($p=0$). La statistique de Mann-Kendall (S) est donnée par les deux équations suivantes :

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

$$\text{sign}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_i - x_j < 0 \\ 0 & \text{if } x_i - x_j = 0 \\ -1 & \text{if } x_i - x_j > 0 \end{cases}$$

- 17 où n est la longueur de la série temporelle, x_i et x_j sont les observations respectivement aux temps i et j (Équation 3).

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

L'équation du τ s'écrit comme suit :

L'équation de la significativité de la tendance s'écrit comme suit : $p=2$

$$[1 - \Phi(|Z|)]$$

- 18 Z suit ici une distribution normale standard. Une valeur positive de Z signifie une tendance à la hausse et une valeur négative une tendance à la baisse. Dès que l'échantillon contient au moins une dizaine de données, la loi de statistique de test Z exprimée ci-dessous peut être approchée par une gaussienne centrée réduite (équation 5) :

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad 5$$

- 19 avec $\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$ (estimation à modifier en cas de répétition de la même valeur dans la série temporelle).
- 20 Le logiciel TerrSet permet de visualiser la significativité statistique du τ de Kendall par des images de Z et de la probabilité p associée (cf. Équation 4, en explicitant $\Phi(|Z|)$ (équation 6) :

$$\phi(|Z|) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{|Z|} e^{-t^2} dt \quad 6$$

- 21 La démarche a débuté par la création d'une série temporelle, à partir du module *Earth Trends Modeler* sur le logiciel TerrSet⁴, en utilisant l'ensemble de la série (2000-2019). Par la suite, un prétraitement a été réalisé en utilisant la fonction Preprocess (Denoise). Cette fonction permet de lisser les séries temporelles en remplaçant les valeurs erratiques (notamment liées aux nuages) par des valeurs interpolées. La série temporelle ainsi corrigée est utilisée pour lancer l'Analyse en composantes principales (ACP). L'ACP a été faite à partir de la matrice de corrélation afin de diminuer le poids des valeurs saisonnières élevées dans l'analyse (Hall-Beyer, 2002). Aucun bruit additif n'a été noté dans le signal enregistré. Le résultat a été utilisé pour lancer la classification non supervisée K-means⁵. Le choix du nombre de classes s'est basé sur les 13 classes identifiées dans les différentes écorégions dont 7 classes de végétation (Tappan et al., 2004 ; CILSS, 2014). Les correspondances thématiques ont été données à chaque classe issue de la classification sur la base de la variation temporelle de l'indice, des connaissances de terrain et des cartes d'occupation et d'utilisation des sols du Sénégal au 1/3 000 000 (Tappan et al., 2004) et au 1/ 50 000 (CILSS, 2016). Le résultat de la classification a permis d'obtenir la carte des classes d'occupation du sol découlant du NDVI sur la période 2000-2019. À la suite, nous avons calculé le NDVI moyen du début (1-15) et de la fin (16-31) de chaque mois pour chaque décennie (2000-2009 et 2010-2019) afin de comparer les courbes et de déterminer les changements de la phénologie. Ce découpage permet d'avoir les détails à l'échelle mensuelle, annuelle, et selon que l'on soit en saison sèche (décembre à mai) ou en saison des pluies (juin à novembre). Le résultat a donné les profils phénologiques saisonniers du NDVI en moyenne de chaque décennie.
- 22 La dernière étape a consisté à calculer le « τ » de Kendall à travers la régression, d'abord sur les 227 valeurs de NDVI (23 synthèses x 10 ans moins 3, les images étant disponibles qu'à partir de la deuxième quinzaine du mois de février 2000) pour la période 2000-2009, ensuite sur les 230 valeurs de NDVI pour la période 2010-2019, et enfin sur les 457 valeurs de NDVI pour la période 2000-2019 (Solly et al., 2021b). Ce calcul est associé au calcul du test de significativité de p . Le seuil utilisé ici pour le test est de 0,1 ($p \leq 0,1$). Il peut varier selon les auteurs de 0,1 (Andrieu, 2018) à 0,001 (Neeti et

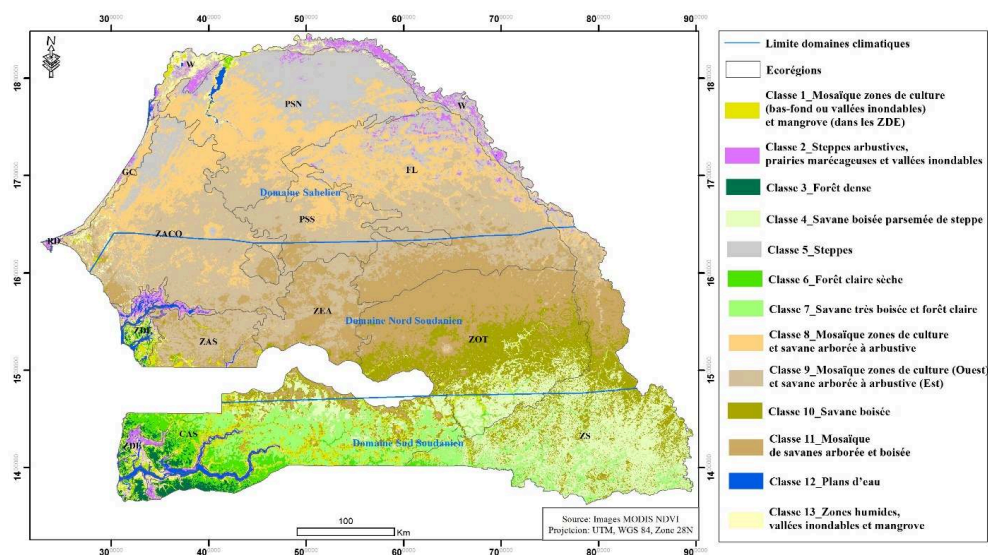
Eastman, 2011) en passant par 0,01 (Mishra et Mainali, 2017), et 0,05 (Herrmann et al., 2005 ; Eckert et al., 2015 ; Teferi et al., 2015 ; Zewdie et al., 2017 ; Guo et al., 2018 ; Zoungrana et al., 2018 ; Noël Gansaonré et al., 2020), et selon l'estimateur utilisé (p, pente TS, Z, TS Intercept). Les deux résultats ont été par la suite croisés (*tau* de Kendall et test de *p*). Cela a abouti aux cartes des tendances de la productivité de la végétation (positive ou augmentation, négative ou diminution, et nulle ou très faible voir sans changement) et la significativité de la tendance pour chaque période.

Résultats

État et variation phénologique du couvert végétal du Sénégal entre 2000-2019

- 23 La carte d'occupation du sol découlant du NDVI sur la période 2000-2019 est présentée dans la figure 2, et la courbe de l'évolution saisonnière moyenne du NDVI décennal des classes est présentée par les figures 3a et 3b. Quatre classes dominent dans le nord du Sénégal. Il s'agit des classes 2, 5, 8 et 13. Elles concernent la vallée du fleuve, la zone pastorale sableuse du nord, la partie nord de la zone pastorale ferrugineuse, la zone agricole du centre-ouest et de la zone pastorale sableuse du sud. La classe 2 correspond à une végétation quasi nulle. Une très faible activité apparaît néanmoins en saison des pluies. La classe 5 montre une activité très faible aussi toujours centrée sur la saison des pluies. La classe 8 présente une courbe en cloche nettement plus contrastée entre les deux saisons. La classe 13 présente une courbe très différente avec une pente positive lente et une saison verte qui s'étend bien au-delà de la saison des pluies, il s'agit d'une signature de zones humides (delta du fleuve Sénégal, région de Niayes) avec une activité végétative de décrue. En termes d'occupation des sols, la classe 2 correspond aux steppes arbustives, aux prairies marécageuses et aux vallées inondables, la classe 5 aux steppes, la classe 8 à une mosaïque de zones de culture et de savane arborée à arbustive, et la classe 13 aux zones humides, aux vallées inondables et aux mangroves. Les classes 2 et 13 sont également présentes dans la zone des estuaires du centre du pays (delta du Saloum) et du sud (estuaire de la Casamance).

Figure 2. Classes d'occupation du sol découlant du NDVI sur la période 2000-2019. Figure 2. Land use classes resulting from NDVI over the period 2000–2019.

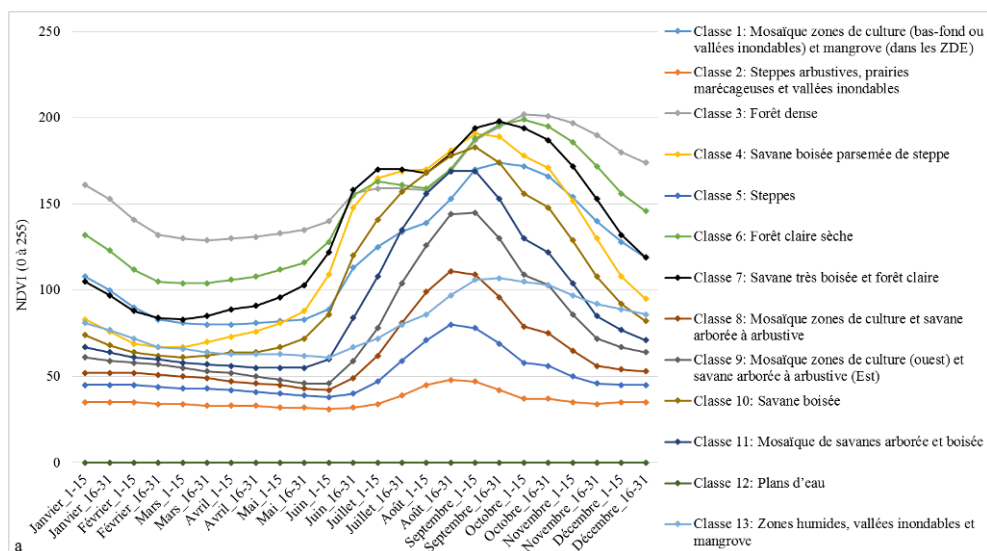


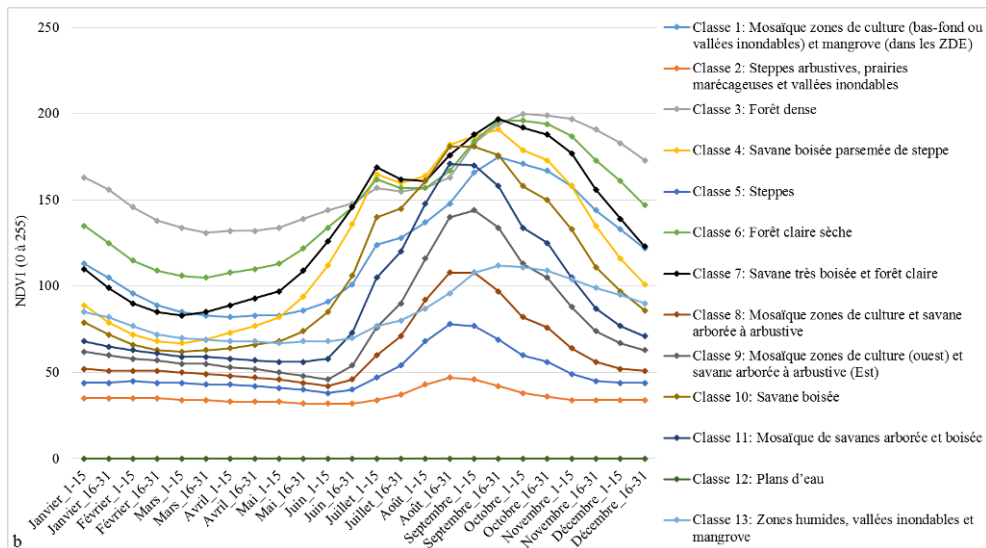
- 24 Les steppes arbustives désignent selon le système de classification Land cover classification system (LCCS) de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), une formation herbeuse ouverte, comportant des touffes disséminées et espacées de graminées (et parfois quelques plantes ligneuses) généralement non parcourues par les feux ; les graminées sont vivaces et ne dépassent pas 80 centimètres de haut en fin de végétation, avec de feuilles étroites, enroulées ou pliées, principalement disposées à la base ; entre les graminées vivaces se trouvent des plantes annuelles qui ne durent qu'une partie de l'année (Di Gregorio et Jansen, 1998). La savane arborée à arbustive correspond à un peuplement d'arbres et d'arbustes disséminés (Descoings, 1978). Il s'agit pour la savane arborée d'une formation avec des arbres et arbustes disséminés dans le tapis graminée et pour la savane arbustive d'une formation caractérisée par la présence d'une strate herbacée continue (Aubréville, 1957), haute de 80 centimètres au moins et parsemée de plantes ligneuses essentiellement constituées d'arbustes. La mangrove désigne un écosystème composé d'arbres et d'arbustes tropicaux adaptés aux sols saumâtres, humides et périodiquement envahis par les marées (Marius, 1985).
- 25 Dans le centre du pays (le sud de la vallée du fleuve, de la zone agricole du centre-ouest, de la zone pastorale sableuse du sud, de la zone agricole du Saloum, de la zone d'extension agricole, de la zone orientale de transition, et de la zone du socle) les classes 9, 10 et 11 dominent. Ces trois classes présentent toutes des courbes en cloche centrées sur la saison des pluies avec un NDVI très faible en saison sèche. Dans l'ordre 9, 11 puis 10, ces classes présentent des saisons d'activité de plus en plus longues et des NDVI maximaux (fin août) de plus en plus importants. La classe 9 correspond à une mosaïque de zones de culture (dans la partie ouest) et de savane arborée à arbustive (dans la partie est). La classe 10 correspond globalement à la savane boisée et la classe 11 à une mosaïque de savanes arborée et boisée.
- 26 La savane boisée correspond à une formation végétale caractérisée par la présence d'une strate herbacée continue, haute de 80 centimètres au moins, parsemée d'arbres et d'arbustes généralement caducifoliés. Elle indique, avec la savane arborée, la présence simultanée d'arbres et d'arbustes. Sauf que, dans la savane arborée, les

ligneux sont disséminés alors que dans la savane boisée, ils forment un couvert généralement clair (Descoings, 1978). Le recouvrement des sols par les cimes des arbres et des arbustes varie entre 25 % et 50 % avec une strate herbacée toujours présente et une taille des arbres pouvant atteindre 12 mètres de hauteur (Adam, 1966).

- 27 Dans les écorégions du sud (sud de la zone orientale de transition, de la zone du socle, de la Casamance, et de la zone de l'estuaire de la Casamance) les classes 1, 3, 4, 6, 7 et 12 dominent. Ces six classes diffèrent des classes plus septentrionales décrites ci-dessus par leurs valeurs assez élevées de NDVI en saison sèche (la classe 4 ayant un NDVI moyen et la classe 3 ayant un NDVI élevé), la longueur de la saison (celui de la classe 1 étant la plus courte, et la classe 3 la plus longue) et un profil bimodal assez peu marqué. Il faut noter dans un premier temps que les classes 3, 4, 6 et 7 (classes de végétation dense), classes que l'on retrouve dans les écorégions du sud, ont enregistré les plus fortes productivités de la végétation. Ces classes ont enregistré deux pics. Le premier survient durant la première quinzaine du mois de juillet, à l'exception de la classe 4 durant la première décennie. Le second pic intervient à la première quinzaine du mois d'octobre pour les classes 3 et 6 ; et à la seconde quinzaine du mois de septembre pour la classe 7. Pour la classe 4, le second pic intervient un peu plus tôt durant la première décennie, c'est-à-dire à la première quinzaine du mois de septembre.
- 28 La classe 1 correspond à une mosaïque de zones de culture (culture de bas-fond ou vallées inondables) et de mangrove (dans la zone des estuaires). La classe 3 correspond globalement aux zones de forêt et notamment aux forêts denses. Elle occupe le sud-ouest de la Casamance. La classe 4 correspond à la savane, particulièrement à la savane boisée parsemée de steppe. La classe 6 correspond globalement aux zones de forêt claire et sèche. La classe 7 correspond à la savane très boisée et à la forêt claire. Quant à la classe 12, il s'agit des plans d'eau. Elle est également présente dans le Nord-Ouest et le Centre-Ouest du pays.

Figure 3. (a) Evolution saisonnière moyenne du NDVI entre 2000-2009 (b) et entre 2010-2019.
Figure 3: (a) Average seasonal evolution of NDVI between 2000–2009 (b) and 2010–2019.



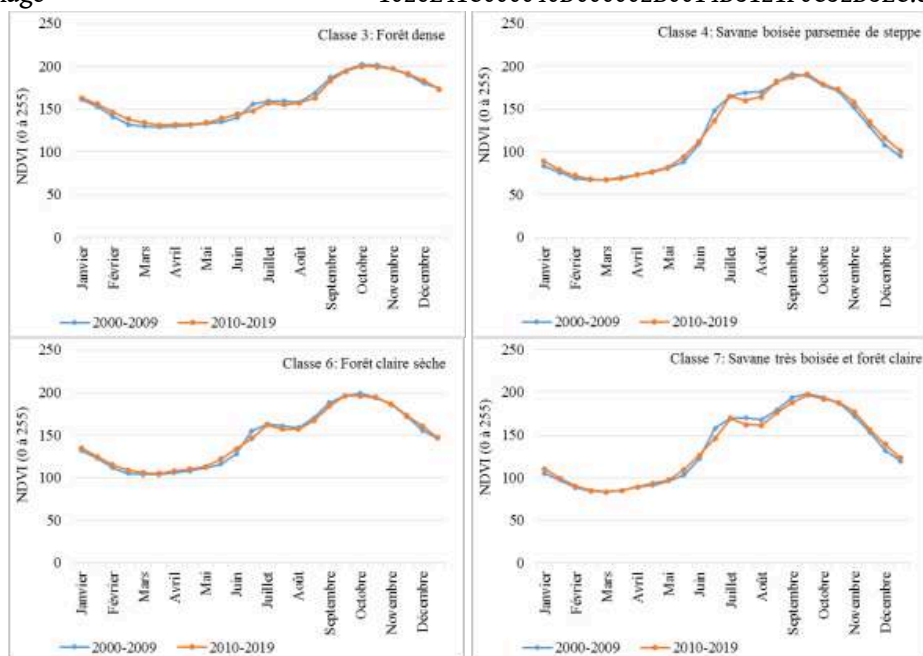


- 29 La forêt claire correspond à un « peuplement ouvert d'arbres atteignant au moins 8 mètres de hauteur ; recouvrement des cimes de 40% ou plus ; strate herbacée généralement à dominance de graminées » (White, 1986. p50). La hauteur moyenne des arbres varie de 8 à 25 mètres (Da Lage et Métailié, 2005). La forêt dense correspond à un « peuplement continu d'arbres atteignant au moins 10 mètres de hauteur, à cimes s'interpénétrant » (White, 1986. p50). Elle est constituée de plusieurs strates avec une canopée dense et des houppiers qui s'imbriquent.
- 30 En termes de changements de l'activité végétative, nous avons noté globalement qu'en saison des pluies, elle est plus importante durant la première décennie. Alors qu'en saison sèche, elle l'est beaucoup plus durant la seconde décennie. Plus précisément le NDVI est légèrement plus important en saison sèche dans la décennie 2010-2019 que dans la décennie 2000-2009. Ensuite, pour la décennie 2010-2019, le premier pic d'activité est contracté à la première quinzaine de juillet alors qu'il était plus long lors de la décennie 2000-2009. En effet, on observe une baisse de l'activité végétale entre la première quinzaine du mois de juillet et la première quinzaine du mois d'août pour les classes 4, 6 et 7 durant la décennie 2010-2019 (figure 4).

Figure 4. Evolution saisonnière moyenne du NDVI entre 2000-2009 et 2010-2019 des classes 3,4, 6 et 7. Figure 4. Average seasonal change in NDVI between 2000–2009 and 2010–2019 for classes 3, 4, 6 and 7

Image

1026E41C000040D000002B0014D3121F0C32D3EC.emf

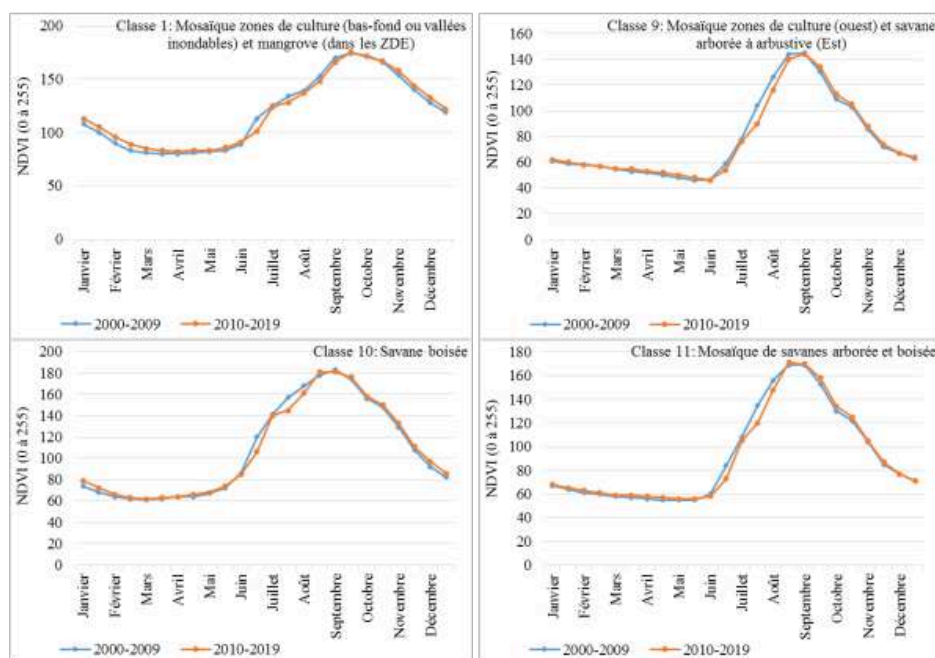


- 31 Pour les courbes 1, 9, 10 et 11, les mêmes modifications de la phénologie sont notées. Il s'agit d'une productivité plus importante pour le début de la saison des pluies durant la première décennie et l'inverse durant la saison sèche (figure 5). Comme pour les courbes du sud, on observe un décalage temporel et une saison verte plus tardive dans les années 2010 que durant les années 2000. Sur une échelle de douze mois, les classes 1 et 11 ont enregistré neuf mois de plus fortes productivités durant la décennie récente que durant la première décennie.

Figure 5. Evolution saisonnière moyenne du NDVI entre 2000-2009 et 2010-2019 des classes 1, 9, 10 et 11. Figure 5. Average seasonal change in NDVI between 2000–2009 and 2010–2019 for classes 1, 9, 10 and 11.

Image

1026198C000040D000002CA7AC7333D7FFE76E73.emf

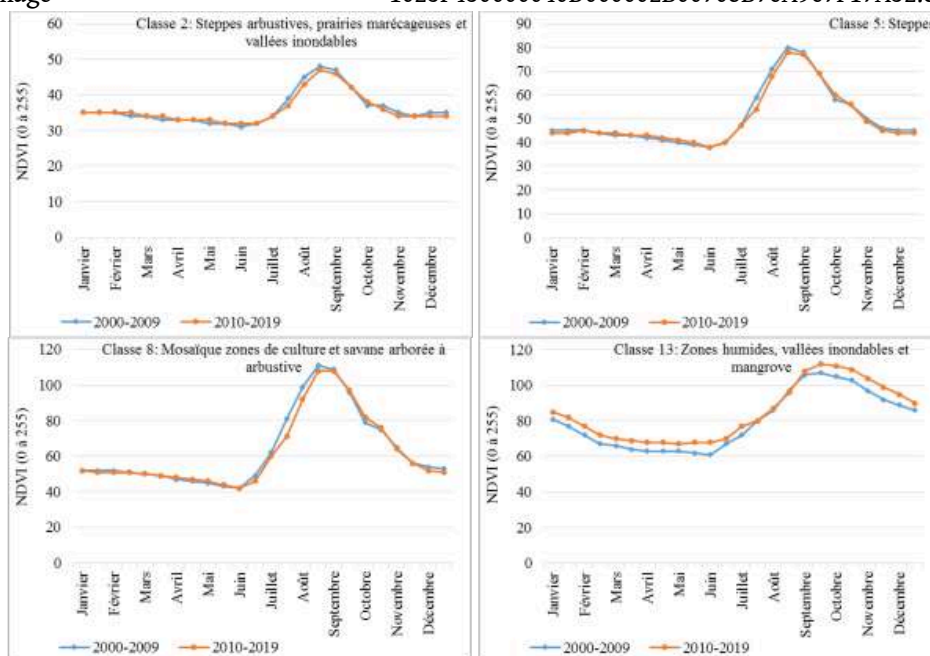


- 32 Quant aux courbes 2, 5, 8 et 13, leur évolution indique que la classe 13 a connu une importante augmentation de la productivité durant cette dernière décennie (figure 6). Cette augmentation de la productivité de la classe 13 s'explique par un retour à des conditions pluviométriques, et dans une moindre mesure, par les actions de reboisement de la mangrove. Par contre, les 3 autres courbes montrent un début de saison plus modeste dans les années 2010, mais sans que des valeurs supérieures en fin de saison ou en saison sèche puissent être observées, contrairement aux classes plus méridionales.

Figure 6. Evolution saisonnière moyenne du NDVI entre 2000-2009 et 2010-2019 des classes 2, 5, 8 et 13. Figure 6: Average seasonal change in NDVI between 2000–2009 and 2010–2019 for classes 2, 5, 8 and 13.

Image

1025F430000040D000002B00708B76A967F17A32.emf



- 33 Le tableau 1 fait la synthèse des valeurs de cumul de NDVI de saison sèche et de saison des pluies pour chaque classe et période. On peut ainsi noter à la lecture globale de ce tableau que les valeurs de NDVI de saison sèche sont plus importantes durant la décennie récente que durant la décennie 2000-2009. Autrement dit, elles ont augmenté entre les deux décennies. Par contre, pour ce qui est de la saison des pluies, nous constatons un NDVI plus important durant la première décennie pour toutes les classes à l'exception de la classe 13 pour laquelle le NDVI a augmenté entre ces deux décennies.

Tableau 1. Synthèse des valeurs de cumul de NDVI de saison sèche et de saison des pluies pour chaque classe et période.

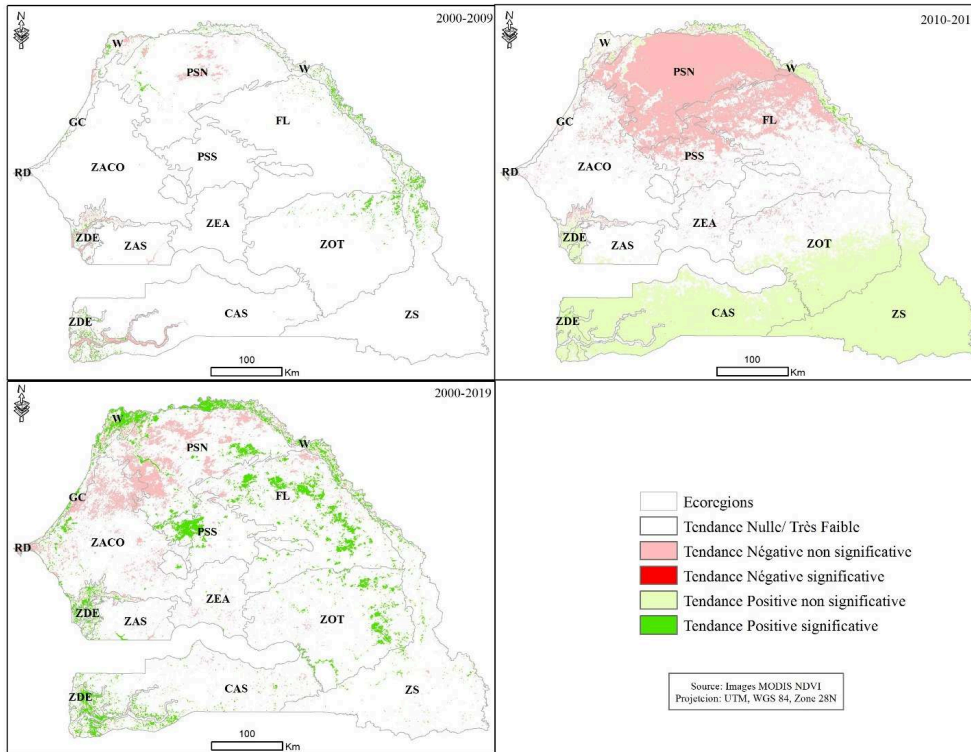
Période	NDVI 2000-2009		NDVI 2010-2019	
	Saison sèche	Saison des pluies	Saison sèche	Saison des pluies
Classe 1: Mosaïque zones de culture (bas-fond ou vallées inondables) et mangrove (dans les ZDE)	1115	1729	1160	1710
Classe 2: Steppes arbustives, prairies marécageuses et vallées inondables	406	461	407	455
Classe 3: Forêt dense	1729	2113	1761	2088
Classe 4: Savane boisée parsemée de steppe	953	1953	987	1942
Classe 5: Steppes	517	692	518	681

Classe 6: Forêt claire sèche	1424	2072	1456	2053
Classe 7: Savane très boisée et forêt claire	1172	2065	1202	2038
Classe 8: Mosaique zones de culture et savane arborée à arbustive	594	924	592	902
Classe 9: Mosaique zones de culture (ouest) et savane arborée à arbustive (Est)	670	1202	680	1180
Classe 10: Savane boisée	832	1748	860	1727
Classe 11: Mosaique de savanes arborée et boisée	736	1475	750	1454
Classe 12: Plans d'eau	0	0	0	0
Classe 13: Zones humides, vallées inondables et mangrove	853	1073	911	1121

Tendances du NDVI entre 2000-2009, 2010-2019 et 2000-2019

- 34 La carte de la corrélation de Kendall et de la significativité durant ces deux décennies indique d'une manière générale, une tendance à l'augmentation du NDVI (augmentation de l'activité végétale), avec des zones de diminution dans quelques écorégions (figure 7). Toutefois, cette tendance est plus significative durant la décennie 2000-2009 que 2010-2019 ; même si nous constatons plus de surfaces marquées par une tendance positive durant la dernière décennie, toutefois non significative.

Figure 7. Tendence du τ de Kendall de la série des images de NDVI et de significativité (p au seuil de 0,1) entre 2000-2009, 2010-2019 et 2000-2019. Figure 7: Kendall's tau trend from NDVI image and significance (p at the threshold of 0.1) between 2000-2009, 2010-2019 et 2000-2019



- 35 Entre 2000-2009, la corrélation varie entre +0,21 et -0,18. Du point de vue spatial, les valeurs de corrélations positives, qui indiquent une augmentation de l'activité végétale, s'observent principalement dans l'est et le sud-ouest du pays. La partie nord-est de la zone orientale de transition, de la zone du socle, ainsi que la vallée du fleuve et la zone des estuaires ont enregistré les plus importantes corrélations avec une tendance significative au test de p . Cette situation expliquerait la productivité de la classe 11 (mosaïque de savane arborée et boisée) durant entre 2010 et 2019. Dans la partie ouest de la zone pastorale sableuse du nord et de la Casamance, on observe également des pixels de valeurs positives avec une tendance significative à l'augmentation de la productivité de la végétation. Celles-ci tournent entre 0,08 et 0,20. Dans la zone des estuaires, cette tendance expliquerait l'augmentation de la productivité des classes 1 et 13 (mosaïque de zones de culture, zones humides, vallées inondables et mangrove). Toujours est-il que, dans la zone des estuaires, dans le centre de la zone pastorale sableuse du nord et dans la vallée du fleuve, on observe des surfaces de tendances à la diminution de la productivité de la végétation, ces tendances sont toutefois non significatives. Le pourcentage de tendance positive significative durant cette période est de 1,21%, celui négatif significative de 0,0022% (tableau 2).

Tableau 2. Superficie en hectare et en pourcentage des tendances positives significatives et négatives significatives entre 2000-2009, 2010-2019 et 2000-2019.

Tendance	2000-2009	2010-2019	2000-2019
Négative significative	0,0022	0,0001	0,0001

Négative non significative	1,36	18,19	5,73
Positive non significative	0,04	31,11	2,16
Positive significative	1,21	0,16	6,01
Nulle/Très faible	97,39	50,54	86,10
Total	100,0	100,0	100,0

- 36 Entre 2010-2019, nous constatons d'une manière générale une augmentation de la productivité de la végétation dans la zone des estuaires, au Sud (Casamance, zone du socle, et zone orientale de transition) et dans la vallée du fleuve Sénégal. La productivité de la végétation est toutefois nulle dans le centre du pays (zone agricole du Saloum, et dans le sud de la zone agricole du centre-ouest et de la zone pastorale ferrugineuse). Cependant, les tendances à l'augmentation de la productivité sont non significatives au test de pValue. Seuls quelques pixels présentant une tendance significative sont observés dans la zone des estuaires et dans la vallée du fleuve Sénégal. Ces pixels représentent 0,16% de la zone d'étude. Durant cette période, la corrélation a varié entre +0,17 et -0,21. Dans le Nord par contre (zone pastorale sableuse du nord et du sud, et le nord de la zone agricole du centre-ouest et de la zone pastorale ferrugineuse), nous remarquons une tendance à la baisse de la productivité, mais cette tendance est non significative. Les valeurs les plus faibles de corrélation s'observent dans la PSS, où elles tournent entre -0,17 et -0,13.
- 37 Pour résumer, nous notons sur la période 2000-2019 une tendance à la baisse de la productivité de la végétation principalement dans la zone pastorale sableuse du nord et la zone agricole du centre-ouest. Dans la zone agricole du Saloum, la zone d'extension agricole, la partie ouest de la zone orientale de transition et est de la Casamance, nous notons quelques pixels de tendances négatives (5,73% du territoire sénégalais). Dans ces écorégions, les valeurs de tendance varient globalement entre -0,54 et -0,05, elles sont toutefois non significatives. Les surfaces avec une tendance à l'augmentation de la productivité de la végétation sont notées au sud-est de la PSN, au nord-est de la PSS, et à l'ouest de la zone agricole du centre-ouest avec des valeurs qui atteignent 0,44. Dans le sud, la partie ouest de la Casamance est la plus concernée par l'augmentation du NDVI. Les écorégions ayant enregistré les plus fortes tendances à l'augmentation de la productivité sont la zone des estuaires (où la mangrove domine comme formation végétale) et la vallée du fleuve Sénégal. Dans ces écorégions les valeurs de tendance varient entre 0,57 et 0,15. De plus, la tendance y est significative au test de p. Une tendance positive significative est également notée dans la partie est de la zone pastorale ferrugineuse, de la zone orientale de transition, et de la zone du socle. Dans la zone côtière, on note aussi des pixels de tendances positives significatives. Les pixels de tendances positives significatives représentent ainsi 6,01% du territoire sénégalais durant les deux dernières décennies.

Discussion

- 38 Cette étude a révélé à travers l'analyse du rythme phénologique de la végétation que le couvert végétal a connu certaines mutations au Sénégal. Les modifications notées au cours des deux dernières décennies (2000 à 2019) et les différentes tendances observées viennent confirmer les constats de plusieurs études depuis plus de quatre décennies. En effet, les tendances notées à l'échelle de certaines écorégions se sont confirmées, tandis que d'autres écorégions ont connu des évolutions.
- 39 Entre 1982 et 2003, une tendance positive et significative a été notée dans les zones pastorales (zone pastorale sableuse du nord, du sud, et la zone pastorale ferrugineuse) et dans la vallée du fleuve Sénégal (Herrmann et al., 2005 ; Neeti et Eastman, 2011). Cette tendance est confirmée durant la période 2000-2009 pour la zone pastorale ferrugineuse et la vallée du fleuve Sénégal. Pour la zone pastorale ferrugineuse, la même tendance est récemment notée par Marega et al., (2021). Dans la partie ouest de la zone pastorale sableuse du nord, d'importantes surfaces sont aussi concernées par cette tendance, mais pour le reste de la zone d'étude, la tendance reste globalement non significative. Leroux et al., (2014) avaient par ailleurs noté qu'au cours de la période 2000-2012 70 % des espaces présentaient des tendances non significatives en Afrique de l'Ouest. De plus, la tendance à l'augmentation du NDVI ne s'est maintenue que pour la vallée du fleuve Sénégal durant la période 2010-2019, une tendance qui n'est pas observée pour les écorégions des zones pastorales.
- 40 Selon Budde et al., (2004), dans les écorégions pastorales, les tendances négatives résultent des facteurs interdépendants liés à la nature des sols, au surpâturage, au compactage des sols, à l'érosion éolienne et hydrique et à la perte du couvert végétal ligneux. À l'inverse, les tendances positives s'expliquent par la faiblesse du pâturage et des pressions humaines et se produisent sur des plateaux plats et où le couvert naturel protège les sols de l'érosion. Dans la zone pastorale ferrugineuse, la tendance négative enregistrée dans la partie nord durant la période 2010-2019, assimilée à la dégradation du couvert végétal, serait liée à la sédentarisation des populations jadis transhumantes, mais également aux conditions naturelles (Sylla et al., 2019).
- 41 Dans le bassin arachidier (zone agricole du centre-ouest), Budde et al., (2004) ont noté une tendance positive à l'augmentation de la jachère qui s'est traduite par l'extension de grandes parcelles de prairie entre 1992 et 2001. Cette tendance positive s'est maintenue durant ces deux dernières décennies (CILS, 2016) avec quelques surfaces d'augmentation de la productivité.
- 42 Dans l'ancienne région administrative du Sénégal Oriental (zone orientale de transition et zone du socle), la productivité végétale qui s'était révélée anormalement faible (Budde et al., 2004) apparaît importante durant ces deux dernières décennies, comparées au reste du pays. Il en est de même dans la région de la Casamance où une tendance négative (Neeti et Eastman, 2011) difficile à expliquer a été notée (Li et al., 2004). Cette situation semble indiquer que les écorégions possédant une plus forte couverture végétale sont celles qui ont le plus souffert de la sécheresse des années 1970-1980. On peut en effet noter que depuis 1990 et le retour à des conditions météorologiques relativement bonnes (Bodian, 2014) ces écorégions ont enregistré une tendance globalement positive à l'augmentation du NDVI. Il en est de même de la zone des estuaires, où la mangrove avait connu une régression importante durant les années

de sécheresses avant de connaître une régénération (Diéye et al., 2013 ; Andrieu et al., 2018) qui s'est matérialisée par une tendance positive significative.

- 43 En Casamance la tendance à l'augmentation du NDVI durant la décennie 2010-2019 ne reflète toutefois pas l'évolution de l'occupation des sols actuelle, qui est marquée par une dégradation des paysages forestiers (Diédhiou, 2019 ; Solly et al., 2020). Cette situation s'explique principalement par l'extraction massive et abusive du bois, mais aussi par l'extension des surfaces agricoles. En effet plus une zone reçoit des précipitations, plus sa couverture végétale naturelle est susceptible d'être transformée en zone agricole par les agriculteurs (Zoungrana et al., 2018).
- 44 Cette étude révèle aussi un décalage temporel de la saison des pluies qui devient de plus en plus tardive. En effet, les études précédentes (Balme et al., 2005 ; Sané et al., 2008 ; Descroix et al., 2015) indiquent que depuis bientôt cinq décennies la saison des pluies débute au plus tôt au courant de la seconde quinzaine du mois de juin, au lieu de la seconde quinzaine du mois de mai, pour prendre fin au plus tard durant la première quinzaine d'octobre ou au plus tôt vers la fin de la seconde quinzaine du mois de septembre. De plus, une fréquence des épisodes secs pendant la saison pluvieuse est également notée, malgré l'augmentation de la durée de la mousson avec le retour des pluies (Descroix et al., 2015). Or, les séquences sèches impactent sur le déroulement du cycle végétatif des plantes et le développement de la végétation (Cissé, 2016), surtout quand la durée est supérieure à cinq jours (Djoufack-Manetsa et al., 2011).
- 45 Cette étude a aussi montré l'importance de l'approche tendentielle pour l'étude de la modification de la couverture végétale. En effet, en utilisant le test contextuel de Mann-Kendall, Neeti et Eastman (2011) ont obtenu un résultat très significatif dans la détection des tendances dans des séries chronologiques relativement courtes. Avec le test de Mann-Kendall, ~11 % de leur zone d'étude a montré une valeur significative ($p < 0,001$), tendance qui a augmenté à 16 % en utilisant le test contextuel de Mann-Kendall. En utilisant le test de corrélation de Kendall ou « tau » de Kendall pour la détection de la cinématique de la végétation en Côte d'Ivoire, Andrieu (2018) a obtenu des corrélations significatives à $p < 0,1$. Ce seuil utilisé dans cette étude nous a aussi valu des résultats satisfaisants. Toutefois, il convient de noter que les tendances peuvent varier selon la série utilisée ; d'où l'importance d'interpréter les résultats avec précaution.

Conclusion

- 46 Le suivi des modifications de la couverture végétale au Sénégal est important pour une meilleure gestion des ressources et pour mieux comprendre le rôle de la variabilité pluviométrique et des actions anthropiques sur l'évolution du milieu. Grâce à une série temporelle d'images MODIS NDVI collectée sur la période 2000-2019, cette étude a tenté de déterminer les changements de la couverture végétale dans les écorégions du Sénégal. Les résultats ont montré des modifications dans l'évolution du rythme phénologique des classes : 3 (qui correspond à la forêt dense présente en Casamance) assimilée à une dégradation, 1 (composée principalement de cultures de bas-fonds et de mangroves en Casamance et dans la zone des estuaires) et 11 (composée de la savane arborée et boisée dans les écorégions du centre du pays) qui sont assimilées à un reverdissement, et 13 (correspondant principalement à la mangrove et aux zones humides dans la zone des estuaires et dans la vallée du fleuve Sénégal) assimilées

également à un reverdissement. Les courbes de l'évolution saisonnière moyenne du NDVI ont aussi indiqué un décalage temporel et une saison verte de plus en plus tardive. La corrélation de Kendall combiné avec le test de significativité de p a indiqué une augmentation de la productivité entre 2000-2009, avec une tendance significative, dans les écorégions de l'est et du sud-ouest du pays, ainsi que de la zone des estuaires. Durant la décennie 2010-2019, une tendance positive, mais non significative, est notée dans les écorégions de la zone orientale de transition, de la zone du socle, et de la Casamance. Cette tendance est cependant significative dans la zone des estuaires et dans la vallée du fleuve Sénégal. Ces tendances semblent également révéler que les écorégions à plus forte couverture végétale sont celles qui ont le plus souffert de la sécheresse des années 1970-1980 et qui souffrent le plus de la variabilité des conditions pluviométriques. Toutefois, pour valider ce constat, il serait intéressant à l'avenir d'intégrer à l'analyse des tendances, les données de terrain, les données d'occupation et d'utilisation des sols, et les données de précipitations spatialisées.

BIBLIOGRAPHIE

- Adam, J.G., 1966, Composition floristique des principaux types physiologiques de végétation du Sénégal, *Journal of the West African Science Association*, 11 (1-2), pp. 81-97.
- 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, *Tropicultura*, 36 (2), pp. 258-270.
- Andrieu, J., Cormier-Salem, M. C., Descroix, L., Diéye, E. H. B., Ndour, N., et Sané, T., 2018, Correctly assessing forest change in a priority West African mangrove ecosystem: 1986–2010 An answer to Carney et al., 2014 paper 'Assessing forest change in a priority West African mangrove ecosystem: 1986–2010, *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 13 (1), pp. 337–347.
- Ariori, S.L., Ozer, P., 2005, Évolution des ressources forestières en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne au cours des 50 dernières années, *Revue internationale de géologie, de géographie et d'écologie tropicales*, pp. 61-68.
- Balme, M., Galle, S., et Lebel, T., 2005, Démarrage de la saison des pluies au Sahel : variabilité aux échelles hydrologique et agronomique, analyse à partir des données EPSAT Niger, *Sécheresse*, 16 (1), pp. 15-22.
- Brandt, M., Hiernaux, P., Rasmussen, K., Mbow, C., Kergoat, L., Tagesson, T., Ibrahim, Y.Z., Wélé, A., Tucker, C.J., et Fensholt, R., 2016, Assessing woody vegetation trends in Sahelian drylands using MODIS based seasonal metrics, *Remote Sensing of Environment*, 183 (2016), pp. 215-225. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.05.027>
- Bodian, A., 2014, Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest), *Physio-Géo*, 8, pp. 297-312.

- Budde, M. E., Tappan, G., Rowland, J., Lewis, J., et 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*, 59, pp. 481-498.
- 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, États-unis, 219 p.
- Cissé, S., 2016, *Étude de la variabilité intra saisonnière des précipitations au Sahel : impacts sur la végétation (cas du Ferlo au Sénégal)*, Thèse de Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 160 p.
- Da Lage, A., Metailie G., 2005. Dictionnaire de biogéographie végétale. Editions CNRS, Paris, 579 p.
- Dardel, C., Kergoat, L., Hiernaux, P., Mougin, E., Grippa, M., et Tucker, C.J., 2014, Regreening Sahel: 30 years of remote sensing data and field observations (Mali, Niger), *Remote Sensing of Environment*, 140, pp. 350-364. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.011>
- Descoings, B., 1978, Les formations herbeuses dans la classification phytogéographique de Yangambi, *Adansonia, série. 2*, 18 (2). pp. 243-256.
- Descroix, L., Diongue Niang, A., Panthou, G., Bodian, A., Sané, Y., Dacosta, H., Malam Abdou M., Vandervaere, J-P., et Quantin, G., 2015, Évolution récente de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest à travers deux régions : la Sénégalie et le bassin du Niger moyen, *Climatologie*, 12, pp. 25-43.
- Di Gregorio, A., Jansen L.J.M., 1998, *Land Cover Classification System (LCCS) : Classification Concepts and User Manual*. Environment and Natural Resources Service, GCP/RAF/287/ITA Africover -East Africa Projet and Soil Resources, Management and Conservation Service, Rome, 157 p.
- Diedhiou, I., 2019, *Entre utilisation et préservation des ressources ligneuses en Afrique de l'Ouest : Dynamique des paysages forestiers en Sénégalie méridionale*, Thèse de Doctorat en cotutelle de l'Université de Paris et Université Assane Seck de Ziguinchor, Sénégal, 444 p.
- Diéye, E.B., Diaw, A.T., Sané, T. et Ndour, N., 2013a, Dynamique de la mangrove de l'estuaire du Saloum (Sénégal) entre 1972 et 2010, *Cybergeo: European Journal of Geography* [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, document 629, mis en ligne le 09 janvier 2013, consulté le 20 avril 2022, <https://doi.org/10.4000/cybergeo.25671>
- Djoufack-Manetsa, V., Fontaine, B., Martiny, N., et Tsalefac, M., 2012, Climatic and demographic determinants of vegetation cover in northern Cameroon, *International Journal of Remote sensing*, 33 (21), pp. 6904-6926.
- Djoufack-Manetsa, V., Brou, T., Fontaine, B., et Tsalefac, M., 2011, Variabilité intrasaisonnière des précipitations et de leur distribution : impacts sur le développement du couvert végétal dans le nord du Cameroun (1982-2002), *Sécheresse*, 22 (3), pp. 159-170.
- Eckert, S., Husler, F., Liniger, H., et Hodel, E., 2015, Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia, *Journal of Arid Environments*, 113, pp. 16-28.
- Eklundh, L., Olsson, L., 2003, Vegetation index trends for the African Sahel 1982-1999. *Geophysical Research Letters*, 30 (8), 1430, <https://doi:10.1029/2002GL016772>
- 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*, 25 (9), pp. 1641-1659.
- Guo, M., Li, J., He, H., Xu, J., et Jin, H., 2018, Detecting Global Vegetation Changes Using Mann-Kendal (MK) Trend Test for 1982-2015 Time Period, *Chinese Geographical Science*, 28, pp. 907-919.

- Hall-Beyer, M., 2002, Comparison of Single Year and Multiyear NDVI Time Series Principal Components, Cold Temperate Biomes, *Proc. of MultiTemp 2001, 1st Int. Workshop on the Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images*, Trento, Italy, June 2001, pp. 355-362.
- Herrmann, S. M., Anyamba, A., et Tucker, C. J., 2005, Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate, *Global Environmental Change*, 15, pp. 394-404.
- Hmimina, G., Dufrêne, E., Pontailleur, J.-Y., Delpierre, N., Aubinet, M., Caquet, B., et 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, pp. 145-158.
- Hountondji, Y.-C.H., 2008, *Dynamique environnementale en zones sahélienne et soudanienne de l'Afrique de l'Ouest : Analyse des modifications et évaluation de la dégradation du couvert végétal*, Thèse de Doctorat en Sciences et Gestion de l'Environnement de l'Université de Liège, 181 p.
- Leroux, L., Bégué, A., et Lo, S.D., 2014, Regional Analysis of Crop and Natural Vegetation in West Africa Based on NDVI Metrics, *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, July 18, 2014.
- Li, J., Lewis, J., Rowland, J., Tappan, G., et Tiezen, L.L., 2004, Evaluation of land performance in Senegal using multi-temporal NDVI and rainfall series, *Journal of Arid Environments*, 59, pp. 463-480.
- Marega, O., San Emeterio, J.-L., Fall, A., et Andrieu, J., 2021, Cartographie par télédétection des variations spatio-temporelles de la couverture végétale spontanée face à la variabilité pluviométrique au Sahel : approche multiscalaire, *Physio-Géo*, 16 (2021), 1-28, [En ligne] URL : <https://doi.org/10.4000/physio-geo.11977>
- Marius, C., 1985, *Mangroves du Sénégal et de la Gambie: écologie, pédologie, géochimie, mise en valeur et aménagement*, Paris, ORSTOM, collection Travaux et Documents, 357 p.
- Michel, P., 1990, La dégradation des paysages au Sénégal. Dans *La dégradation des paysages en Afrique de l'Ouest*, J.-F. Richard (eds), Séminaire de Dakar, 21-26 novembre 1988, pp. 37-53.
- Mishra, N.B., Mainali, K.P., 2017, Greening and browning of the Himalaya: Spatial patterns and the role of climatic change and human drivers, *Science of the Total Environment*, 587-588, pp. 326-339.
- Mishra, N.B., Crews, K.A., Neeti, N., Meyer, T., et Young, K.R., 2015, MODIS derived vegetation greenness trends in African Savanna : Deconstructing and localizing the role of changing moisture availability, fire regime and anthropogenic impact, *Remote sensing of environment*, 169, pp. 192-204.
- Neeti, N., Eastman, J.R., 2011, A Contextual Mann-Kendall Approach for the Assessment of Trend Significance in Image Time Series, *Transactions in GIS*, 15 (5), pp. 599-611.
- Nicholson, S.E., Davenport, M.L., et 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*, 17, pp. 209-241.
- Noël Gansaonré, R., Zougrana, B.J.-B., et Isidore Yanogo, P., 2020, Dynamique du couvert végétal à la périphérie du Parc W du Burkina Faso, *Belgeo*, 1 (2020), pp. 1-23.
- Nouaceur, Z., 2020, La reprise des pluies et la recrudescence des inondations en Afrique de l'Ouest sahélienne, *Physio-Géo*, 15 (2020), pp. 89-109 [En ligne] URL : <https://journals.openedition.org/physio-geo/10966>

- Omernik, J., 1995, Ecoregions: a spatial framework for environmental management, dans Davis, W., Simon, T.(Eds.), *Biological Assessment and Criteria: Tools for Water Resource Planning and Decision Making*, Lewis Publishers, CRC Press, Boca Raton.
- Philippon, N., Martiny, N., Camberlin, P., et Richard, Y., 2008, Impact des précipitations sur l'activité photosynthétique de la végétation en Afrique semi-aride sub-saharienne, *Journées de Climatologie* – Nantes, 13-14 mars 2008, Climat et société : Climat et végétation, pp. 77-90.
- 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., et Mering, C., 2011, Détection des changements de la couverture végétale au Sahel durant la période 1982-2002 à partir des données NDVI et précipitation, *Télé-détection*, 10 (2-3), pp. 135-143.
- Sané, T., Diop, M., et Sagna, P., 2008, Étude de la qualité de la saison pluvieuse en Haute-Casamance (Sud Sénégal), *Sécheresse*, 19 (1), pp. 23-28.
- Solly, B., Diéye, E.H.B., Sy, O., Jarju A. M., et Sané T., 2021a, Détection des zones de dégradation et de régénération de la couverture végétale dans le sud du Sénégal à travers l'analyse des tendances de séries temporelles MODIS NDVI et des changements d'occupation des sols à partir d'images Landsat, *Revue Française De Photogrammétrie Et De Télé-détection*, 223, 1-15, [En ligne] URL : <https://doi.org/10.52638/rfpt.2021.580>
- Solly, B., Jarju, A. M., Sonko, E., Yaffa, S., et Sawaneh, M., 2021b, Detection of recent changes in Gambia vegetation cover using time series MODIS NDVI, *Belgeo*, 1, 1-14, [En ligne] URL : <https://journals.openedition.org/belgeo/47995>
- Solly, B., Dieye, E. H. B., Mballo, I., Sy, O., Sané, T., et Thior, M., 2020, Dynamique spatio-temporelle des paysages forestiers dans le sud du Sénégal : cas du département de Vélingara, *Physio-Géo*, 15 (2020), pp. 41-67, [En ligne] URL : <https://journals.openedition.org/physio-geo/10634>
- Stancioff, A., Staljanssens, M., et Tappan, G., 1986, Cartographie et télédétection des ressources de la République du Sénégal. Étude 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*, 13 (2019), pp. 115-132, [En ligne] URL : <https://journals.openedition.org/physio-geo/8178>
- Tappan, G. G., Sall, M., Wood, E. C., et Cushing, M., 2004, Ecoregions and land cover trends in Senegal, *Journal of Arid Environments*, 59, pp. 427-462.
- Teferi, E., Uhlenbrook, S., et Bewket, W., 2015, Inter-annual and seasonal trends of vegetation condition in the Upper Blue Nile (Abay) Basin: dual-scale time series analysis, *Earth System Dynamics*, 6, pp. 617-636.
- Wessels, K. J., Bergh, F. V. D., et Scholes, R. J., 2012, Limits to detectability of land degradation by trend analysis of vegetation index data, *Remote sensing of environment*, 125, pp. 10-22.
- White, F., 1986, La végétation de l'Afrique (mémoire accompagnant la carte de la végétation), Paris : UNESCO-AETFAT-UNSO (collection *Recherches sur les ressources naturelles*), n° 20, 384 p.
- Yengoh, G. T., Dent, D., Olsson, L., Tengberg, A. E., et 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., et 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, pp. 167–178.

Zoungrana, B. J-B., Conrad, C., Thiel, M., Amekudzi, L. K., et 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*, 153, pp. 66–75.

NOTES

1. Régions écologiques qui présentent des profils similaires de conditions biophysiques et de gestion humaine. Elles sont généralement considérées comme des régions d'homogénéité relative dans les systèmes écologiques comportant des interrelations entre les organismes et leur environnement (Omernik, 1987).
2. Le satellite NOAA a l'avantage de fournir des images pour l'étude du NDVI sur un pas de temps plus long (1981-2016). Toutefois, les images sont fournies avec une résolution spatiale grossière de 8 kilomètres.
3. En termes de longue série temporelle NDVI (de plus de 10 ans), cette série est à l'heure actuelle celle qui est la mieux résolue spatialement. Les images sont téléchargées sur le site internet [en ligne] URL : <https://search.earthdata.nasa.gov/>. Les données sont de la version 6 des indices de végétation du spectromètre imageur à résolution moyenne Terra (MOD13Q1).
4. TerrSet est un système logiciel géospatial intégré pour la surveillance et la modélisation du système terrestre pour le développement durable. Le système TerrSet intègre les outils IDRISI GIS Analysis et IDRISI Image Processing ainsi qu'une constellation d'applications verticales. Plus d'informations disponibles sur le site internet [en ligne] URL : <https://gis.harvard.edu/tererset>
5. L'algorithme K-means est basé sur l'analyse agrégative de pixels. Il requiert la fixation du nombre de classes à extraire des données, la localisation arbitraire du nombre de noyaux et leur repositionnement par itérations successives jusqu'à leur séparation spectrale optimale.

RÉSUMÉS

Cette étude cherche à analyser les changements de la couverture végétale dans les écorégions du Sénégal durant ces deux dernières décennies (2000 à 2019) à l'aide d'une série temporelle d'images MODIS *Normalized difference vegetation index* (MODIS NDVI) de 16 jours et d'une résolution spatiale de 250 mètres. La méthode de l'étude est une combinaison de la télédétection et de la statistique. Le traitement des données a obéi à trois principales étapes : l'Analyse en composantes principales (ACP) sur la série temporelle 2000-2019 suivie de la classification non supervisée en utilisant le résultat de l'ACP ; le calcul du NDVI moyen des 23 périodes de 16 jours ; le calcul de la corrélation ou « tau » (τ) de Kendall associé au test de significativité de $p \leq 0,1$. Les résultats indiquent des modifications dans l'évolution du rythme phénologique des classes correspondant aux cultures de bas-fond, aux vallées inondables, à la mangrove, à la forêt dense, et à la savane arborée et boisée. Certaines modifications sont assimilables à une dégradation, et d'autre à un reverdissement. De même, il a été constaté un décalage temporel et une saison verte plus tardive. En effet, la corrélation de Kendall a indiqué une augmentation du NDVI entre

2000-2009 principalement dans les écorégions de l'est du pays, du sud-ouest et de la zone des estuaires avec une tendance significative. Durant la décennie 2010-2019, un ensemble de petites zones de progression a été noté. Par contre, les valeurs de corrélations négatives de NDVI, qui dénotent une diminution de l'activité végétative, s'observent principalement dans les écorégions du nord et du centre-ouest du pays avec une tendance toutefois non significative.

This study seeks to analyze changes in vegetation cover in the ecoregions of Senegal over the past two decades (2000 to 2019) using a time series of 16-day MODIS NDVI images with a spatial resolution of 250m. The study method is a combination of remote sensing and statistics. The data processing followed three main steps which are: first, the Main Component Analysis (PCA) on the 2000-2019 time series followed by the unsupervised classification using the PCA result; second, the calculation of the average NDVI of the 23 16-day periods; third, the calculation of the Kendall correlation or "tau" (τ) associated with the p 0.1 significance test. The results indicate changes in the phenological rhythm of the classes corresponding to lowland crops, floodable valleys, mangroves, dense forests, and wooded and wooded savannah. Some modifications are similar to degradation, and others to a greening. Similarly, there was a time lag and a later green season. Kendall's correlation indicated an increase in NDVI between 2000-2009 primarily in the eastern, southwest and estuarine (ZDE) ecoregions with a significant trend. During the 2010-2019 decade, a set of small areas of progress was noted. On the other hand, the negative correlations of NDVI values, which indicate a decrease in vegetative activity, are observed mainly in the northern and central-western ecoregions of the country, although with a non-significant trend.

INDEX

Keywords : MODIS-NDVI, remote sensing, re-greening, degradation, vegetation cover, Senegal

Mots-clés : MODIS-NDVI, télédétection, reverdissement, dégradation, couverture végétale, Sénégal

AUTEURS

BOUBACAR SOLLY

Chercheur-associé, Département de Géographie, Laboratoire de Géomatique et d'Environnement, Université Assane SECK de Ziguinchor, Sénégal, adresse courriel : b.solly1087@zig.univ.sn

JULIEN ANDRIEU

Maître de conférences, Département de Géographie, Université Côte d'Azur, Centre national de la recherche scientifique, Espace, Nice, France, adresse courriel : julien.andrieu@univ-cotedazur.fr

EL HADJI BALLA DIEYE

Maître assistant, Département de Géographie, Laboratoire de Géomatique et d'Environnement, Université Assane SECK de Ziguinchor, BP 523, Sénégal, adresse courriel : edieye@univ-zig.sn

ARUNA M JARJU

Coordonnateur du soutien scolaire, King Graduate School-Monroe College, New York, USA, adresse courriel : ajarju@monroecollege.edu