



HAL
open science

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

Julien Andrieu

► To cite this version:

Julien Andrieu. 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*, A paraître. halshs-01729146v1

HAL Id: halshs-01729146

<https://shs.hal.science/halshs-01729146v1>

Submitted on 14 Mar 2018 (v1), last revised 14 Jan 2019 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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

J. Andrieu^{1*}

Keywords: Remote sensing- TSA- NDVI- Phenology- Forest-savanna transition- Ivory Coast

Résumé

Une approche de télédétection multiscalair et multisatellitaire a été mise en place pour étudier les changements de la végétation, en particulier de la limite forêt-savane d'abord sur une région englobant la Côte d'Ivoire et le Bénin à 8 km de résolution de 1981 à 2006, puis sur la Côte d'Ivoire seule, à 250 m de résolution de 2002 à 2014. Ces deux séries temporelles de NDVI (AVHRR et MODIS) ont été étudiées d'une part avec la corrélation de Kendall et d'autre part avec une métrique originale permettant de distinguer les végétations dont l'activité photosynthétique présente respectivement un rythme unimodal (une saison des pluies et une saison d'activité végétative) ou bimodal (deux saisons des pluies et deux pics d'activité végétative).

Summary

Vegetation Change Analysis in Ivory Coast During Conflicts Using a Phenological Metric and Kendall Correlation of two NDVI Time Series

A multiscale and multisatellite remote sensing approach has been set up in order to study vegetation changes, in particular the forest-savanna limit, first over a region including Côte d'Ivoire and Bénin with an 8 km resolution, from 1981 to 2006, then over Côte d'Ivoire only, with a 250 m resolution, from 2002 to 2014. Both the NDVI time series (AVHRR et MODIS) has been studied on the one hand with Kendall correlation and on the other hand, an original metric which enable to distinguish vegetation which photosynthesis present a unimodal rhythm (one rainy season and one vegetative activity season) or bimodal rhythm (two rainy seasons and two vegetative activity seasons).

Introduction

Le couvert végétal, en Afrique de l'Ouest, connaît d'importantes mutations (20, 21, 43) en réaction plus ou moins directe aux évolutions du climat (40) et aux activités anthropiques (5). La première est le principal facteur de changements aux latitudes soudano-sahéliennes (28), la seconde est le premier facteur aux latitudes soudaniennes et guinéennes (43). Parmi les études des mutations de la végétation, une attention particulière a souvent été portée à l'interface entre la forêt et la savane dans l'espace et dans le temps, d'Aubrèville (4) à Barima (6) par exemple. Parmi les facteurs anthropiques des mutations du couvert végétal, ceux liés aux conflits armés de Côte d'Ivoire dans les années 2000 ont été étudiés par le programme «Dynamiques paysagères en période de crises politico-militaires en Côte d'Ivoire: influences sur la gestion et la disponibilité des terres agricoles et la sécurité alimentaire». Les dynamiques paysagères liées à ce conflit y sont étudiées à travers une série d'hypothèses dont la première, ici testée, est que la dynamique de savanisation de la végétation, amorcée depuis des décennies, s'est fortement accentuée après les années 2000. Le but de cet article est donc, pour tester cette hypothèse, d'examiner les cinématiques de la transition forêt-savane à échelle macro-régionale et à échelle décennale (1981-2006) et à une échelle plus locale (Côte d'Ivoire) sur la période des conflits (2002-2014). L'impact du conflit sur la dégradation du couvert forestier sera recherché en Côte d'Ivoire, en particulier dans la Forêt Classée du Haut Sassandra (FCHS) qui servira ici, d'une certaine manière, de «réalité terrain» puisque la dégradation y a été amplement démontrée (8).

Pour ce faire, nous utilisons l'indice normalisé de végétation (NDVI) qui transcrit, en valeur quantitative, une intensité de l'activité photosynthétique à un moment donné, ses valeurs sommées ou moyennées renseignent dans une certaine mesure sur la productivité primaire, sa variation annuelle renseigne sur la phénologie.

L'Afrique de l'Ouest est organisée par une transition biogéographique latitudinale (4).

Les régions équatoriales, les plus régulièrement arrosées, sont couvertes par une forêt tropicale humide sempervirente. Celle-ci laisse place à la forêt tropophile sub-sempervirente à phénologie bimodale puisque la végétation connaît deux pics de forte activité séparés par un ralentissement de l'activité en juillet-août avec la petite saison sèche, et une plus grande mise en dormance de novembre à mars.

Plus au nord, la savane forestière connaît un cycle unimodal où l'activité végétative croît au début de la saison des pluies et décroît en saison sèche. La longueur et l'intensité de cette saison végétative unimodale se dégradent progressivement vers les régions désertiques (4). Notre région concerne, au sein de cette zonation, la transition entre les forêts tropophiles à cycle bimodal et les savanes soudaniennes à cycles unimodal.

Nous testons l'idée que le processus de savanisation apparaisse, soit sous la forme d'une variation spatio-temporelle de la limite entre ces deux cycles, soit sous la forme d'une baisse tendancielle de l'activité végétative. D'une part, le NDVI permet d'estimer la productivité de la végétation et de détecter, par des changements de productivité, des changements du couvert forestier.

D'autre part, une lecture phénologique de la variation annuelle du NDVI renseigne sur la limite entre les rythmes (bimodal/unimodal) de l'intensité de l'activité chlorophylliennes (30). Le but est d'abord une étude à l'échelle macrorégionale sur 25 ans afin d'étudier le cadre phénologique et climatique de potentiels processus de savanisation pour pouvoir, ensuite, à l'échelle régionale insérer dans ce contexte la situation en Côte d'Ivoire durant les conflits et étudier plus finement la dynamique associée aux conflits. Nous associons pour cela l'analyse de deux séries temporelles d'images de NDVI différentes.

Echelles d'étude et données

Site d'étude

Cette étude est donc basée sur une analyse multiscalaire avec, comme plus petite échelle, une macro-région qui englobe la Côte d'Ivoire et le Bénin pour représenter le zonage bioclimatique et pour comparer la cinématique de la végétation du Bénin ayant connu la paix et de la Côte d'Ivoire ayant connu la guerre.

La région cartographiée ici couvre donc également la totalité du Togo et du Ghana ainsi que le Sud du Mali, du Burkina Faso et du Niger (Figure 1). L'échelle intermédiaire correspond à la dalle MODIS qui couvre la quasi-totalité de la Côte d'Ivoire (Figure 1). Cette échelle où le zonage structure toujours la biogéographie, permet cependant de faire aussi ressortir des anomalies locales liées à l'action de l'Homme. Un site ivoirien, la FCHS, est représentatif de localité ayant connu une importante déforestation liée aux conflits. Ainsi, sans véritablement changer d'échelle, puisque la résolution de l'imagerie reste la même, une attention particulière lui sera accordée au sein de l'analyse à l'échelle de la Côte d'Ivoire.

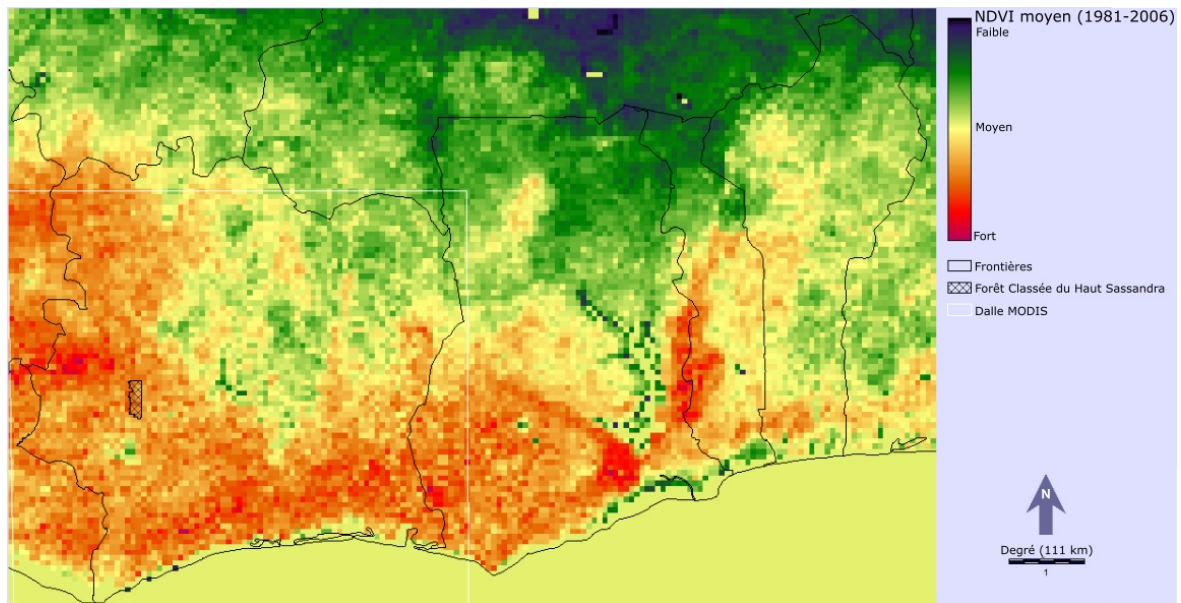


Figure 1: Localisation des zones d'études emboîtées sur fond de 1ère composante principale de la série temporelle de NDVI.

Données

Le NDVI du Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) est disponible pour une période de 25 ans de 1981 à 2006. Le jeu de données provient d'images obtenues depuis l'instrument Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) des satellites 7, 9, 11, 14, 16 et 17 de la NOAA. Ce jeu de données a été corrigé pour la calibration, la géométrie, les aérosols volcaniques, et d'autres effets non reliés aux changements de la végétation (49). Les images ont une résolution de 8 km, ce qui a pour conséquence de lisser, de façon puissante, toutes les structures locales de l'occupation du sol et des écosystèmes pour ne transmettre qu'une information phénologique du couvert végétal dans son ensemble (2). Une comparaison de 4 produits de NDVI issus du AVHRR (9) affirme que, pour les études de changement, le jeu de données GIMMS est le meilleur. Il convient cependant de noter que les interprétations des tendances de ce jeu de données GIMMS NDVI, aux zones Soudano-Guinéennes, doivent rester prudentes (22). C'est pourquoi, d'une part, nous couplons une approche en tendance d'une approche en métrique, d'autre part nous nous intéressons aux valeurs de saison sèche et de petite saison sèche pour réduire l'effet de saturation du NDVI et enfin, nous l'articulons avec des données MODIS de sorte à assurer la robustesse de nos affirmations.

Le jeu de données, de juillet 1981 à décembre 2006, couvre une longue période d'importants changements pour l'Afrique de l'ouest. Une période de sécheresse, de 1968 à 1994 (14, 15, 40) a été suivie d'un retour à des conditions plus pluvieuses, depuis 1994 (41). La série temporelle débute donc au cœur de la période de sécheresse, à quelques années de l'année 1984 fréquemment retenue comme la plus sèche pour la très grande majorité des stations (31). Elle ne permet pas d'étudier les évolutions liées au début de cette période de sécheresse mais elle est particulièrement adaptée aux observations phénologiques de la fin de la période sèche et du début de la période pluvieuse (3). En ce qui concerne les conséquences des conflits armés sur la Côte d'Ivoire (2000-2011), le jeu de données est assez mal positionné dans le temps. Ne permettant pas une couverture temporelle de la deuxième moitié de la période de conflits ni des premières années de paix.

Le produit «MODQ13 MODIS NDVI 16-day composite grid data» (MOD13Q1) a été téléchargé depuis le portail Earth Observing System (EOS). Les images ont une résolution de 250 m. Cette résolution efface les microstructures (parcellaires) mais révèle les structures locales à micro-régionales. Il s'agit, en termes de séries temporelles de NDVI, de la plus haute résolution spatiale à l'heure actuelle. La série temporelle va de janvier 2002 à décembre 2014 et couvre donc la quasi-totalité de la période de conflits en Côte d'Ivoire (2000-2011). Les tendances de Terra MODIS sont les plus précises (22).

Méthodes

Corrélation de Kendall

La télédétection permet de suivre les tendances de la biomasse végétative à partir de séries temporelles d'indices de végétation à haute résolution temporelle (infra-mensuelle) sur une échelle décennale (3, 19, 29, 32, 33, 35, 38, 42).

Pour ce faire, la corrélation de Kendall ou « tau » de Kendall est ici utilisée. Elle mesure la corrélation de rang entre deux variables. Les équations I et II donnent pour la corrélation (S).

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

et

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

Où n est la longueur de la série temporelle, x_i et x_j sont les observations respectivement aux temps i et j (Equation III).

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

Le calcul est associé aux tests de significativité dont la probabilité (p) représente la mesure de la nécessité de rejeter une hypothèse nulle ($p=0$). Les cartes de significativité ne seront pas présentées, l'ensemble des fortes corrélations (négatives ou positives des cartes publiées) étant significatives au test $P < 0,1$. La méthode ici proposée débute par le calcul de la corrélation de Kendall sur la série temporelle totale associé aux calculs de significativité. Ensuite sont calculées, séparément, les corrélations de Kendall pour chacune des 24 synthèses de 15 jours (AVHRR) ou des 23 synthèses de 16 jours (MODIS) avec un pas de temps annuel. Nous avons, pour cela, calculé la moyenne des images de la valeur de corrélation des synthèses de la saison sèche d'une part et de la saison des pluies d'autre part. Ces corrélations moyennes renseignent sur la tendance, sur le long terme, de la végétation pour les deux saisons. D'une part, ce découpage saisonnier permet d'éliminer le principal bruit rendant les séries bimodales impropres à une corrélation de Kendall (17). D'autre part, cela permet de renseigner à la fois sur la production de biomasse et sur les rythmes.

Métriques phénologiques

La détection et le suivi des différences phénologiques entre la végétation au rythme unimodal et celle au rythme bimodal ont fait l'objet de travaux en zones agricoles (34) ou bien en zones forestières (50). C'est ici cette même approche qui est recherchée. C'est une lecture biogéographique des cycles phénologiques saisonniers qui est ici recherchée. Chaque pixel présente un profil temporel, nous avons cherché à formaliser une métrique phénologique booléenne décrivant l'unimodalité ou la bimodalité du rythme. La métrique est la différence entre la valeur du NDVI de la deuxième quinzaine de mai et la deuxième quinzaine du mois d'août (Figure 2). En effet, les régions de cycle unimodal soudanaises connaissent, entre ces deux dates, une croissance du NDVI liée à l'augmentation des précipitations alors que les régions guinéennes, à cycle bimodal, connaissent leur valeur maximale de NDVI en mai avant de décroître en réponse à la réduction des précipitations de la petite saison sèche.

L'image sera classée en deux classes distinctes en fonction de la pente positive ou négative entre ces deux dates, distinguant le cycle bimodal guinéen du cycle unimodal soudanais par ce simple moyen. Nous avons choisi de découper les deux séries temporelles en 2 périodes égales. Pour NOAA, cela correspond à l'année 1994 qui est, en outre, l'année qui marque la rupture entre la période de sécheresse et la période plus arrosée actuelle (41). Pour MODIS, la rupture entre 2008 et 2009, soit deux ans après les accords de Ouagadougou, marque un virage important pour les territoires situés vers la zone de confiance au centre de la Côte d'Ivoire. Comme le principal phénomène étudié, la conversion de la forêt en cacaoculture, possède une inertie de quelques années, ce décalage reste pertinent pour distinguer deux périodes. Si, par exemple, durant la première période (1981-1994 pour NOAA ou 2002-2008 pour MODIS) la pente est positive et que, durant la deuxième période (1995-2006 pour NOAA ou 2009-2014 pour MODIS) la pente est négative, le pixel a connu une transition d'un rythme unimodal à un rythme bimodal (Figure 3).

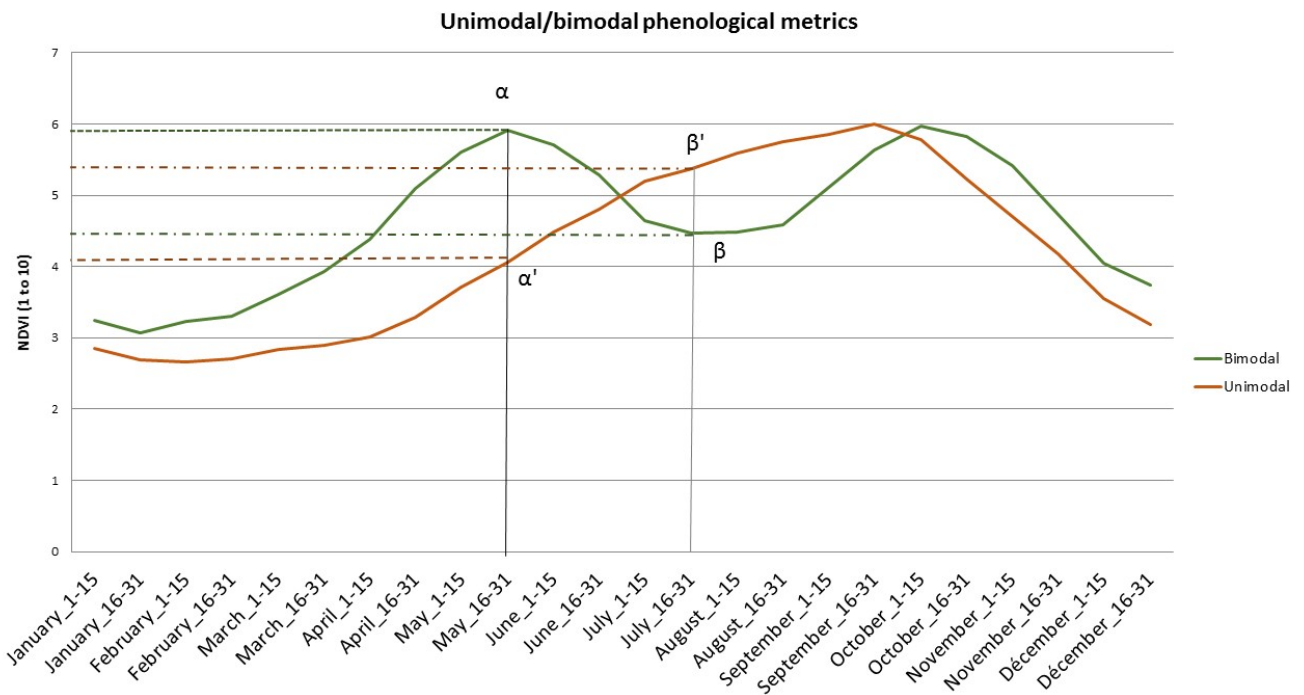


Figure 2: Illustration de la métrique de distinction entre le rythme unimodal et le rythme bimodal.

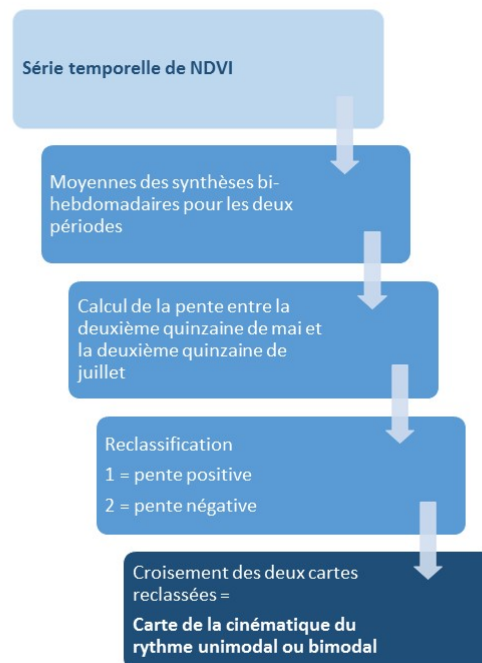


Figure 3: Organigramme de la chaîne de traitements d'images pour la distinction et la cinématique de la transition entre phénologie unimodale et bimodale.

Résultats

Echelle régionale de 1982 à 2006 (NOAA)

La moyenne des corrélations de Kendall bihebdomadaires de saison des pluies (Figure 4) montre une structure macro régionale opposant, avec une transition progressive, les régions de part et d'autre du 9ème degré de latitude. Dans le détail, les valeurs de corrélation négatives s'observent essentiellement au centre de la Côte d'Ivoire avec des corrélations entre -0,1 et -0,3 ces corrélations sont faibles mais significatives. A l'opposé, c'est surtout le sud-est du Burkina-Faso où s'observent les corrélations positives, entre 0,2 et 0,4.

La moyenne des corrélations de Kendall bihebdomadaires de saison sèche (Figure 5) montre une bien plus grande homogénéité avec une corrélation positive quasiment omniprésente, à part un semis irrégulier de pixels isolés de corrélation négative et une corrélation nulle à très faiblement négative sur le littoral.

La végétation soudanienne montre donc une augmentation des valeurs de NDVI, tant en saison sèche qu'en saison des pluies. En revanche, la végétation de la zone guinéenne connaît une augmentation des valeurs de NDVI en saison sèche associée à une réduction des valeurs de NDVI en saison des pluies.

Le phénomène principal est donc celui d'une modification du régime saisonnier, ce qui justifie l'approche phénologique ci-dessous.

La figure 6 montre les stabilités ou transitions entre cycle bimodal et unimodal pour les deux périodes.

On y retrouve de nouveau une division autour du 9ème degré de latitude avec, au sud, un rythme bimodal stable dominant et au nord un rythme unimodal stable dominant. Ensuite apparaît une bande longitudinale caractérisée par le passage, après 1994, du rythme unimodal à un rythme bimodal. Celle-ci est particulièrement large au nord-est de la Côte d'Ivoire. Elle correspond à 14,4 % des pixels (Tableau 1). On aperçoit également un semis de pixels essentiellement concentrés sur les frontières nord-ouest de la Côte d'Ivoire, caractérisé par une cinématique régressive, c'est-à-dire par le passage d'un rythme bimodal à un rythme unimodal. Il ne s'agit que de 2,3 % des pixels. Il est possible de considérer les situations du Bénin et de l'ouest ivoirien comme assez proches.

Côte d'Ivoire de 2002 à 2014 (MODIS)

Pour la moyenne des corrélations de Kendall de saison des pluies sur la période 2002-2014, à l'échelle de la Côte d'Ivoire à assez haute résolution (Figure 7), la structure zonale de la précédente analyse n'apparaît pas. La carte représente en effet une situation générale de stabilité ou de changements non significatifs dans laquelle apparaît un ensemble de tendances significatives locales, où la progression du NDVI dans le temps domine dans l'est du pays et où la régression domine dans l'ouest. Pour la moyenne des corrélations de Kendall de saison sèche, toujours sur la période 2002-2014, la structure zonale réapparaît légèrement. La carte représente une tendance à la progression du NDVI dans le temps au nord-est du pays et à la stabilité et à la régression dans l'Est et le Sud. Ici aussi, il s'agit uniquement de situations locales aux tendances significatives.

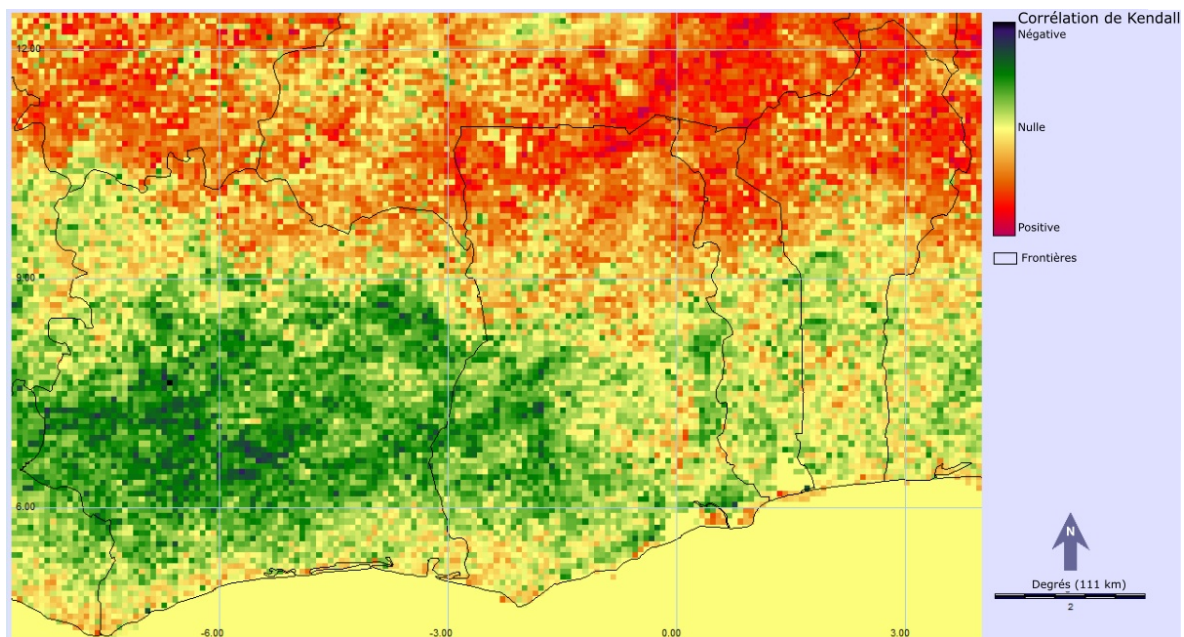


Figure 4: Carte de la moyenne des images de corrélation de Kendall de la saison des pluies à l'échelle macro régionale de 1981 à 2006.

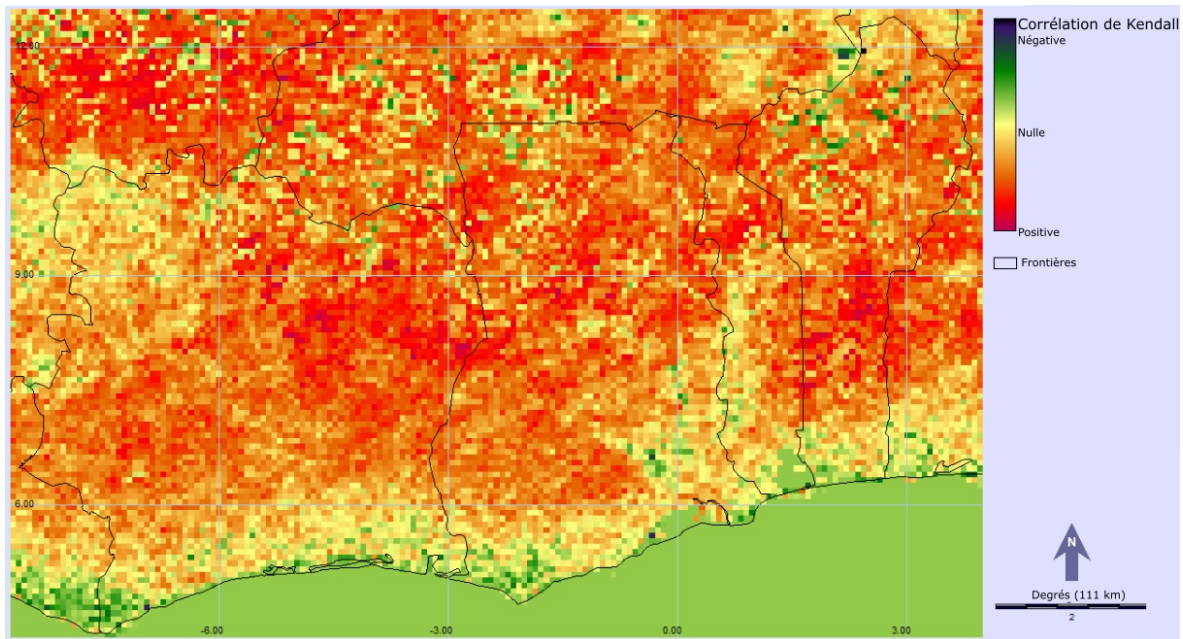


Figure 5: Carte de la moyenne des images de corrélation de Kendall de la saison sèche à l'échelle macro régionale de 1981 à 2006.

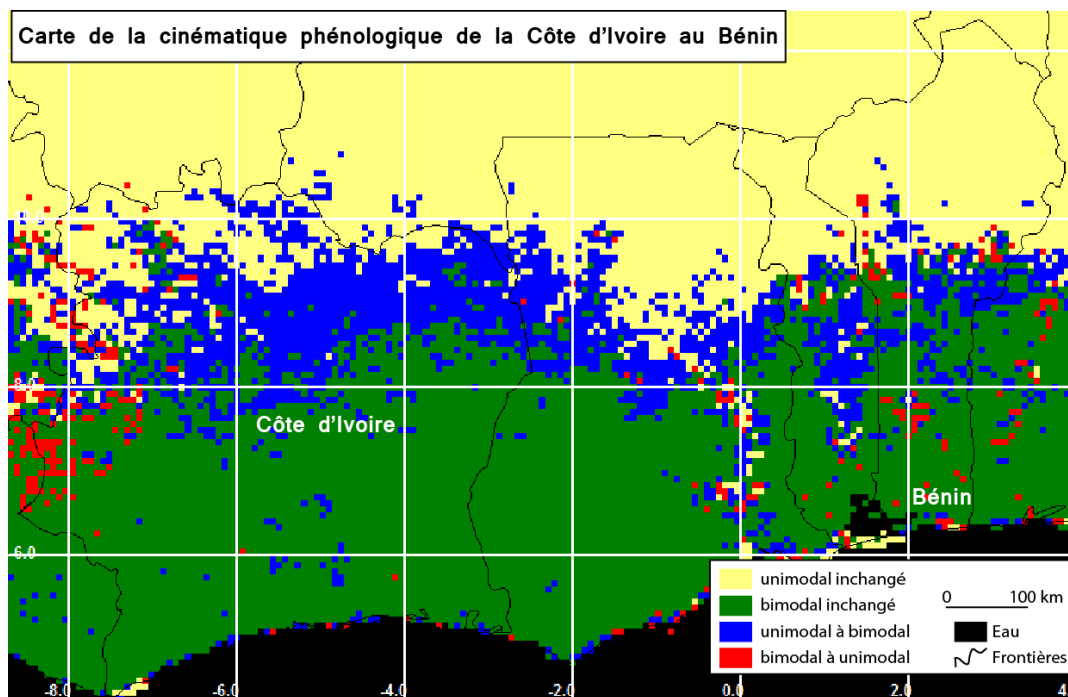


Figure 6: Carte de la cinématique des cycles saisonniers du NDVI Avant et après 1994.

Tableau 1

Matrice de transition des rythmes phénologique avant et après 1994 (en %).

	Unimodal (82-93)	Bimodal (82-93)	Total
Unimodal (94-2006)	43,9	2,3	46,2
Bimodal (94-2006)	14,4	39,4	53,8
Total	58,3	41,7	100

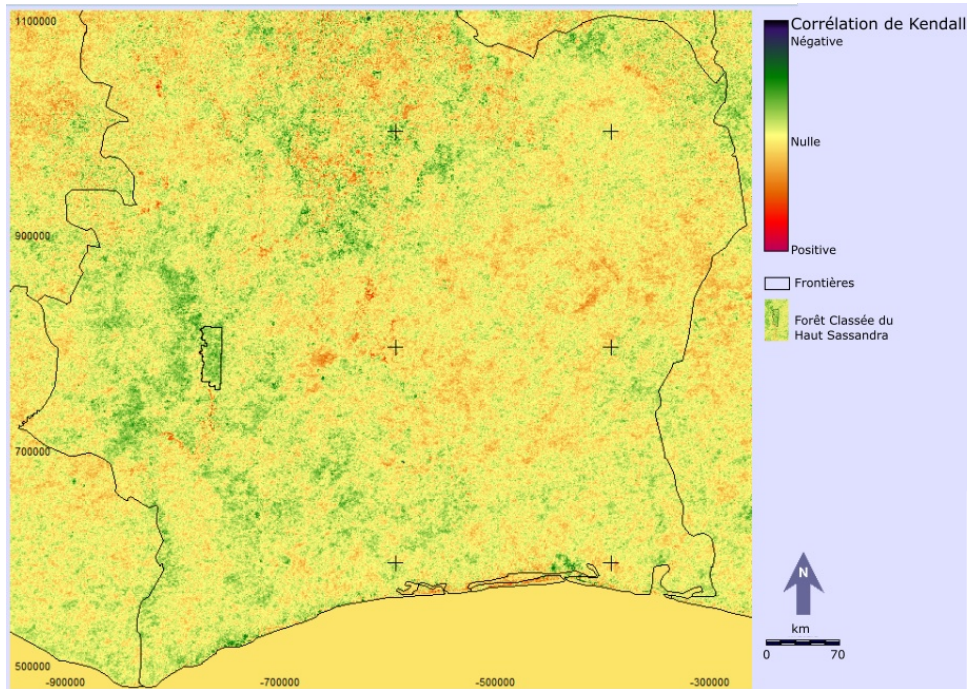


Figure 7: Carte de la moyenne des images de corrélation de Kendall de la saison des pluies à l'échelle de la Côte d'Ivoire de 2002 à 2014.

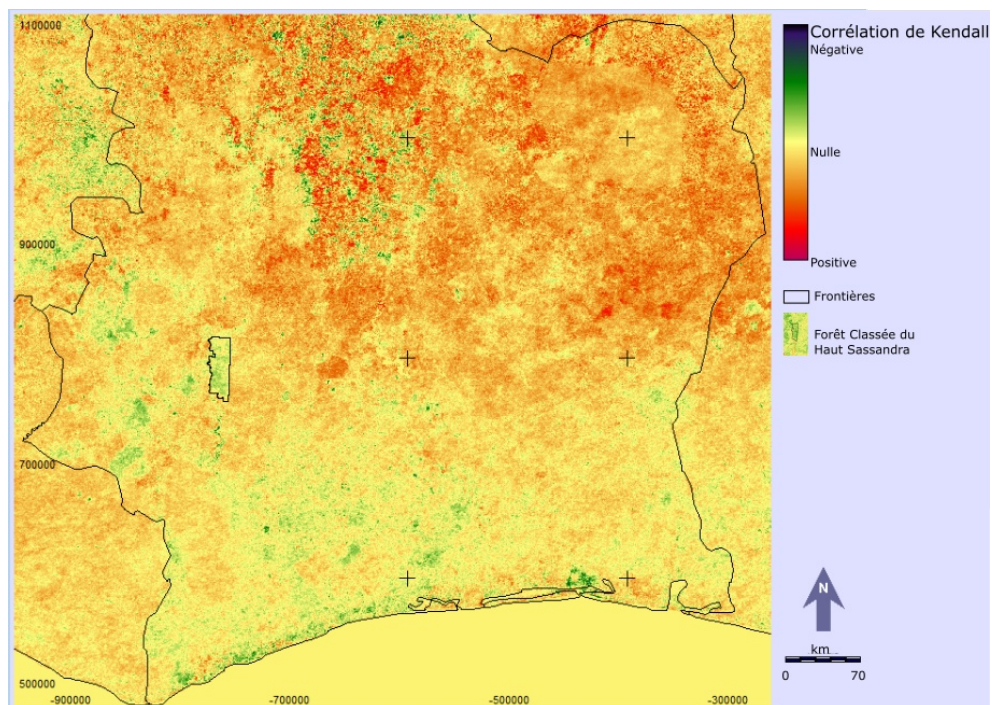


Figure 8: Carte de la moyenne des images de corrélation de Kendall de la saison des pluies à l'échelle de la Côte d'Ivoire de 2002 à 2014.

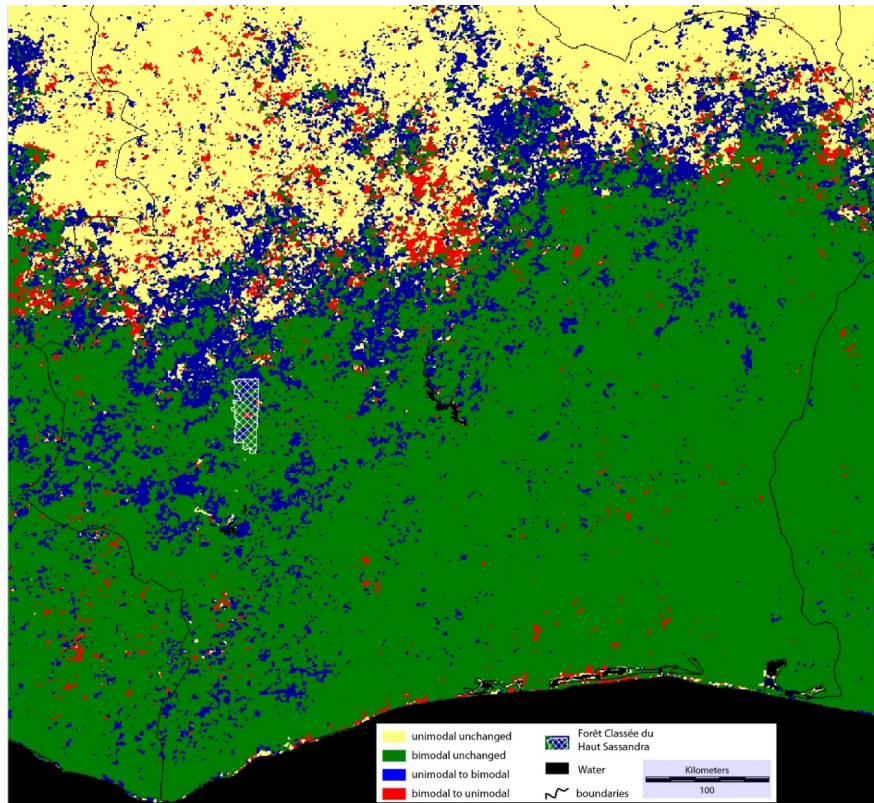


Figure 9: Carte de la cinématique des cycles saisonniers du NDVI Avant et après 2008.

Tableau 2
Matrice de transition dans les rythmes
phénologique en Côte d'Ivoire avant et après 2008.

	Unimodal (03-08)	Bimodal (03-08)	Total
Unimodal (09-14)	18.9	6.4	25.3
Bimodal (09-14)	17	57.7	74.7
Total	35.9	64.1	100

Sur les moyennes des corrélations des deux saisons, la FCHS apparaît avec des corrélations négatives, démontrant clairement la régression du couvert végétal. Les tests confirment la significativité de cette diminution des valeurs de NDVI entre 2002 et 2014 pour la FCHS. Comme une importante déforestation y a été observée (8) ceci nous offre une certaine confiance dans l'interprétation de l'ensemble des localités caractérisées par une corrélation significativement négative aux deux dates en termes de déforestation.

La carte 9 montre que les deux-tiers sud de la Côte d'Ivoire sont dans l'ensemble caractérisés par une stabilité entre 2002 et 2014 dans le rythme bimodal.

La limite, d'axe ouest-sud-ouest / est-nord-est, met en évidence le tiers nord-ouest de la Côte d'Ivoire caractérisé par une stabilité entre 2002 et 2014 dans le rythme unimodal. De part et d'autre de la limite ainsi que dans le sud-ouest du pays, des secteurs sont caractérisés par un passage d'un rythme unimodal entre 2002 et 2008 à un rythme bimodal entre 2009 et 2014. Il s'agit de 17 % de la zone d'étude (Tableau 2). Un plus petit nombre de secteurs (6,4 %), au nord de la limite actuelle a connu la transition inverse de bimodal à unimodal.

Discussion

Le retour aux conditions plus pluvieuses

Les études basées sur des séries temporelles de NDVI en Afrique affirment que le premier facteur expliquant les variations du NDVI est d'ordre climatique, que ces études cherchent à étudier ces relations entre le climat et la végétation (13, 28, 37), ou au contraire qu'elles essayent de lire l'action de l'homme en addition d'une tendance liée au climat (12, 39, 48).

La dynamique de reverdissement de l'Afrique de l'Ouest a été mainte fois observée aux latitudes sahéliennes (28) et a été expliquée par le retour aux conditions plus pluvieuses (41). Nous avons pu, dans cet article, confirmer que les observations des zones sahéliennes et soudanienne peuvent être associées à un phénomène annexe caractérisant la transition soudano-guinéenne entre forêt et savane: une migration vers le nord de la limite entre les végétations de rythme unimodal et bimodal ces dernières décennies.

Dans toute l'Afrique de l'ouest des hotspots ont été détectés (10) où l'évolution du NDVI était mal corrélée à l'évolution des précipitations. Une grande bande qui relie le centre de la Côte d'Ivoire au Nord du Bénin a ainsi été cartographiée comme un hotspot de résidus positifs dans le sens où le reverdissement y est supérieur à ce qui y était modélisé avec les évolutions du climat. La transition entre la végétation au rythme bimodal et celle au rythme unimodal ici cartographiée a donc bien été déjà signalée comme un secteur d'augmentation du NDVI. Si cette augmentation est supérieure à ce que prédisait un modèle basé sur le climat, c'est peut-être lié à une mauvaise prise en compte du caractère bimodal du climat. En effet, puisque le reverdissement du Sahel est expliqué par un renforcement au nord du Front Inter-Tropical, il serait logique que pendant la période récente où les pluies sont assez fortes au Sahel, la petite saison sèche soit plus marquée dans le sud de la Côte d'Ivoire. Ceci pourrait expliquer que le NDVI de saison sèche ait connu une augmentation de 1981 à 2006 alors que le NDVI de saison des pluies a connu une réduction.

La dégradation du couvert

En changeant d'échelle spatiale et de fenêtre temporelle, l'analyse a révélé, en Côte d'Ivoire, les secteurs qui ont connu une dégradation du couvert végétal. Ils constituent 5,5% de la zone d'étude. D'une part, au sud-ouest d'une ligne allant d'Abidjan à Man, se trouvent la grande majorité des phénomènes de dégradation ainsi définis. Ensuite on observe un phénomène de moindre envergure le long de la frontière est, entre le littoral et Abengourou. Enfin, un ensemble de petites taches de dégradation se retrouvent dans le Worodougou.

On voit sur cette carte le rôle contrasté des aires protégées puisque d'une part le Parc National de Taï apparaît comme stable au milieu de la région la plus dégradée et d'autre part la FCHS apparaît comme l'une des principales taches de dégradation.

Il reste important de nuancer ces propos dans la mesure où l'on retrouve au nord-est, d'importantes superficies où la tendance est à la progression du NDVI. Ces superficies correspondent à 12% de la zone d'étude. Soit plus du double des surfaces en dégradation. En revanche, ces secteurs semblent s'inscrire dans la tendance régionale climatique du renforcement des pluies et de l'amélioration du NDVI qui y correspond.

Discordance entre la diachronie de la métrique phénologique et l'approche en tendances

La correspondance entre phénologie et physiologie n'est cependant pas absolue, et il est possible en effet que la cinématique phénologique, ici détectée, ne puisse pas s'interpréter directement sous forme de conversion forêt-savane qui reste avant tout une dimension physiologique.

Cependant, la cinématique phénologique n'en reste pas moins un puissant indicateur de l'évolution de la végétation (13).

Cette approche est sectorielle dans la complexité du tapis végétal. Elle ne peut prétendre à percevoir avec précision les dynamiques botaniques (disparitions ou apparitions d'espèces) ni même physiologiques de la végétation (réduction ou augmentation de la densité de certaines strates). Or, elle semble ici avoir montré, et avec une grande facilité, les grands traits physiologiques de la végétation de cette partie de l'Afrique de l'ouest. La cinématique phénologique ici décrite ne peut donc pas être interprétée comme une réelle conversion de la savane en forêt, ni même comme un renforcement de la strate arborée au dépend de la strate herbacée. Cependant elle reste la démonstration que la physiologie de certaines régions de physiologie soudanienne a évolué en suivant un fonctionnement de l'écosystème qui va dans le sens d'une transition vers le fonctionnement physiologique des forêts guinéennes.

En outre, il est très important de discuter de l'apparente contradiction entre d'une part les deux analyses à l'échelle macro-régionale et l'approche phénologique à l'échelle de la Côte d'Ivoire et, d'autre part l'analyse par corrélation de Kendall à l'échelle de la Côte d'Ivoire. En effet, seule cette analyse à cette échelle révèle les modifications anthropiques du couvert végétal alors que les trois autres convergent dans la représentation de la réponse aux fluctuations de la pluviosité.

Premièrement, cela est dû à la question d'échelle spatiale, en effet, l'échelle macro-régionale, avec ses pixels de huit kilomètres et une discrétisation en deux classes ne permet pas de faire apparaître des dégradations locales du couvert végétal.

Deuxièmement, cela est dû à la question temporelle dans la mesure où entre 1981 et 2006 nous avons une bonne représentativité de la fluctuation des pluies et une mauvaise représentativité du conflit et des dégradations des forêts ivoiriennes qu'il a provoquées. La série temporelle 2002-2011 est ici plus adaptée à la détection des conséquences du conflit. Troisièmement, l'approche par métriques phénologique détectait seulement la dynamique saisonnière, indépendamment de l'ordre de grandeur des valeurs de NDVI. Ainsi, les secteurs tels que la FCHS ont connu en même temps une réduction générale des valeurs de NDVI expliquées par la déforestation et un renforcement du caractère bimodal de ces valeurs, lié au climat qui a connu un renforcement de la distribution bimodale de ses pluies.

Confrontation aux travaux de terrain

Pour achever cette discussion, une confrontation à des études qui comprennent un volet de terrain est nécessaire. Premièrement, en 1984 déjà, on observait que la dynamique naturelle de la végétation se fait dans le sens de la savane se transformant en forêt et non l'inverse (16). Dans plusieurs régions de transition forêt-savane africaines, les dynamiques des zones de transitions sont ainsi caractérisées par une afforestation (6, 7). En effet, les conditions climatiques actuelles semblent plus favorables à la reforestation de cette région (45). Des études botaniques et phytosociologiques consacrées à la structure et à la dynamique de l'écotone en divers pays d'Afrique confirment également ces observations: au Ghana (47), en Côte d'Ivoire (7, 24, 25, 46), au Togo (26), au Nigeria (1), au Cameroun (18, 27, 36), en Centrafrique (11) et au Congo (23, 44).

Cependant, des dynamiques contraires ont été observées dans certaines régions de la Côte d'Ivoire. Une avancée significative des savanes au détriments des forêts ont été signalées dans la zone de contact au Centre-ouest (24) et à l'Est de la Côte d'Ivoire (6). Avant tout, nous pouvons confirmer l'observation de la réduction de NDVI pour la FCHS où toutes les analyses convergent : la télédétection multispectrale, les observations de terrain, l'écologie du paysage et la modélisation (8).

Conclusion

Ces 35 dernières années, la végétation a, à l'échelle macro-régionale, montré une réponse à l'amélioration des précipitations, sous la forme d'une augmentation de l'intensité de l'activité végétative en saison sèche. Le nord est, en outre, également caractérisé par une amélioration de l'intensité de l'activité végétative en saison des pluies. Cette tendance est inversée au sud où s'observe une réduction de l'intensité de l'activité végétative en saison des pluies, plus exactement en petite saison sèche. Il s'agit d'une migration, vers le nord de la limite entre les végétations qui connaissent une activité végétative à une saison et celles qui connaissent une activité végétative à deux saisons avec une dormance partielle à la petite saison sèche.

En examinant, avec les mêmes méthodes, la période récente pour la seule Côte d'Ivoire avec une résolution plus fine, premièrement, on aperçoit que cette tendance s'est poursuivie sur la décennie 2000 avec l'apparition de ce phénomène localement dans le centre ouest de la Côte d'Ivoire. Deuxièmement, apparaît un deuxième phénomène, opposé au premier, sous la forme de tendances de diminution locales du NDVI dans des secteurs stables sur ce point dans les années 1980 et 1990.

Un certain nombre de massifs forestiers semblent donc avoir connu à la fois une forte diminution de productivité primaire mais associé, pour la végétation présente, à un renforcement du caractère bimodal de sa phénologie. La dégradation, lorsqu'elle est présente, ne doit pas être qualifiée ici de savanisation mais de défrichement agricole.

Références bibliographiques

- Adejuwon J.O. & Adesina F.A., 1992, *The nature and the dynamics of the forest-savanna boundary in south-western Nigeria*, pp 331-351. In: P.A. Furley, J. Proctor & J.A. Ratter (Editors), *Nature and dynamics of forest-savanna boundaries* Chapman and Hall, London, 616 p.
- Andrieu J., 2008, *Dynamique des paysages dans les régions septentrionales des Rivières-du-Sud (Sénégal, Gambie, Guinée-Bissau)*. Thèse de doctorat de Géographie. Université Paris Diderot Paris 7, 534 p.
- Anyamba A. & Tucker C.J., 2005, Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981–2003. *J. Arid Environ.*, **63**, 596–614.
- Aubréville A., 1949, *Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale*. Société d'Éditions Géographiques, Maritimes et Coloniales, Paris, 351 p.
- Barbier E. B., 2000, The economic linkages between rural poverty and land degradation: some evidence from Africa. *Agric., Ecosyst. Environ.*, **82**, 355-370
- Barima Y.S.S., 2009, *Dynamique, fragmentation et diversité végétale d'un paysage de transition forêt-savane dans le département de Tanda* (Côte d'Ivoire) PhD Thesis, Université Libre de Bruxelles
- Barima Y.S.S., Egnankou W.M., N'Doumé C.T.A., Kouamé F.N. & Bogaert J., 2010, Modélisation de la dynamique du paysage forestier dans la région de transition forêt- savane à l'Est de la Côte d'Ivoire. *Télétection*, **9**, 129-138
- Barima Y.S.S., Kouakou A.T.M., Bamba I., Sangne Y.C., Godron M., Andrieu J., Bogaert J., 2016, Cocoa crops are destroying the forest reserves of the Classified Forest of Haut-Sassandra (Ivory Coast), *Global Ecol. Conserv.*, **8**, 85-98.
- Beck H.E., McVicar T.R., Van Dijk A.I.J.M., Schellekens J., Richard, J., de Jeu A.M. & Bruijnzeel L.A., 2011, Global evaluation of four AVHRR–NDVI data sets: Intercomparison and assessment against Landsat imagery, *Remote Sens. Environ.*, **115**, 2547–2563
- Boschetti M., Nutini F., Brivio P.A., Bartholomé E., Stroppiana D., & Hoscilo A., 2013, Identification of environmental anomaly hot spots in West Africa from time series of NDVI and rainfall, *J. Photogramm. Remote Sens.*, **78**, 26–40
- Boulvert Y., 1990, *Avancée ou recul de la forêt centrafricaine, changements climatiques, influence de l'Homme et notamment des feux*, pp 353-366. In: R. Lanfranchi and D. Schwartz (Editors) *Paysages Quaternaires de l'Afrique Centrale Atlantique*. ORSTOM, Collection Didactiques, Paris, 543 p.
- Box E.O., Holben B.N., Kalb V., 1989, Accuracy of the AVHRR Vegetation Index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO₂ flux. *Vegetatio*, **80**, 71–89.
- Camberlin P., Martiny N., Philippon N. & Richard Y., 2007, Determinants of the interannual relationships between remote sensed photosynthetic activity and rainfall in tropical Africa. *Remote Sens. Environ.*, **106**, 199-216
- Dacosta H., 1992, *Variabilité des précipitations sur le bassin versant du Saloum*. 87-111. In Diaw A. T. (Editor) *Gestion des ressources côtières et littorales du Sénégal*, Atelier de Gorée, 500 p.
- Dai A., Lamb P.J., Treberth K., Hulme M., Jones P. D. & Xie P., 2005, The recent Sahel Drought is real, *Int. J. Climatol.*, **24**, 1323–1331
- Devineau J.L., 1984, *Structure et dynamique de quelques forêts tropicales de l'Ouest africain* (Côte d'Ivoire). PhD Thesis, Pierre et Marie Curie, Paris, 303 p.
- Detsch F., Otte I., Appelhans T. & Nauss T., 2016, A Comparative Study of Cross-Product NDVI Dynamics in the Kilimanjaro Region—A Matter of Sensor, Degradation Calibration, and Significance, *Remote Sens.*, **8**, 159.
- Dounias E., 1996, Recrûs forestiers post-agricoles: perceptions et usages chez les Mvae du Sud-Cameroun. *J. Agric. Trad. Bot. Appl.*, **38**, 153-178
- Eckert S., Hüsler F., Liniger H. & Hodel E., 2015, Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia, *J. Arid Environ.*, **113**, 16-28
- FAO, 2008, *Les conflits armés, cause principale des crises alimentaires dans le monde*. FAO, Rome, Italie. 45 p.
- FAO, 2015, *Global Forest Resources Assessment 2015. How are the World's Forests Changing?* Second edition. FAO, Rome, Italie. 54 p.
- Fensholt R., Rasmussen K., Nielsen T.T. & Mbow C., 2009, Evaluation of earth observation based long term vegetation trends — Intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data, *Remote Sens. Environ.*, **113**, 1886-1898.
- Foresta H., 1990, *Origine et évolution des savanes intramayombiennes* (R.P. du Congo): apports de la botanique forestière, pp 326-335. In R. Lanfranchi & D. Schwartz (Editors) *Paysages Quaternaires de l'Afrique Centrale Atlantique*. ORSTOM, Collection Didactiques, Paris, 543 p.
- Gautier L., 1989, *Forest-savanna boundary in central Ivory-Coast: evolution of forest surface of the Lamto reserve* (South of V-Baoulé). Soc Botanique France. 85-92.
- Goetze D., Horsch B. & Porembski S., 2006 Dynamics of forest-savanna mosaics in north- eastern Ivory Coast from 1954 to 2002, *J. Biogeogr.*, **33**, 653-664.
- Guelly K.A., Roussel B. & Guyot M., 1993, Installation d'un couvert forestier dans les jachères de savanes au Sud-Ouest Togo, *Bois For. Trop.*, **235**, 37-48.
- Happi Youta J., 1998, *Arbres contre graminée: la lente invasion de la savane par la forêt au Centre-Cameroun*. PhD Thesis, Université de Paris-Sorbonne, Paris. 241 p.
- Herrmann S.M., Anyamba A., Tucker C.J., 2005, Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate, *Global Environ. Change*, **15**, 394-404.
- Heumann B.W., Seaquist J.W., Eklundh L. & Jonsson P., 2007, AVHRR derived phenological change in the Sahel and Soudan, Africa, 1982-2005, *Remote Sens. Environ.*, **108**, 385-392.

30. Hmimina G., Dufrêne E., Pontauiller J.-Y., Delpierre N., Aubinet M., Caquet B., de Grandcourt A., Burban B., Flechard C., Granier A., Gross P., Heinesch B., Longdoz B., Moureaux, C. Ourcival J.M, Rambal S., Saint-André L. & 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 Sens. Environ.*, **132**, 145–158
31. Hulme M., Doherty R., Ngara T., New M. & Lister D., 2001, African climate change: 1900-2100. *Climate Res.*, **17**, 145-168.
32. Hutchinson J.M.S., Jacquin A., Hutchinson S.L. & Verbesselt J., 2015, Monitoring vegetation change and dynamics on U.S. Army training lands using satellite image time series analysis, *J. Environ. Manage.*, **150**, 355-366.
33. Jacquin A., Sheeren D. & Lacombe J.P., 2010, Vegetation cover degradation assessment in Madagascar savanna based on trend analysis of MODIS NDVI time series, *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinf.*, **12**, 3-10
34. Jakubauskas M.E., Legates D.R., Kastens J.H., 2002, Crop identification using harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data. *Computers Electronics Agric.*, **37**, 127-139.
35. Jamali S., Seaquist J., Eklundh L. & Ardo J., 2014, Automated mapping of vegetation trends with polynomials using NDVI imagery over the Sahel, *Remote Sens. Environ.*, **141**, 79-89
36. Letouzey R., 1968, *Etude phytogéographique du Cameroun. Editions Paul Lechevalier*, Paris. 508 p.
37. Lia J., Lewisa J., Rowland B.J., Tappan G., & Tieszen L.L., 2004, Evaluation of land performance in Senegal using multi-temporal NDVI and rainfall series, *J. Arid Environ.*, **59**, 463–480.
38. Mbow C., Fensholt R., Nielsen T.T. & Rasmussen K., 2014, Advances in monitoring vegetation and land use dynamics in the Sahel, *J. Geogr.*, **114**, 84-91
39. Nicholson S E., Davenport M.L. & 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**, 209–241
40. Nicholson S., 2001 “Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries”. *Climate Res.*, **17**, 123-144.
41. Nicholson S., 2005, On the question of the recovery of the rains in the West African Sahel, *J. Arid Environ.*, **63**, 615-641.
42. Omuto C.T., Vargas R.R., Alim M.S. & Paron P., 2010, Mixed-effects modelling of time series NDVI-rainfall relationship for detecting human-induced loss of vegetation cover in drylands, *J. Arid Environ.*, **74**, 1552-1563
43. Richard J.F., 1990, *La dégradation des paysages en Afrique de l'Ouest. Dakar: Université Cheikh Anta Diop*. 313 p.
44. Schwartz D., Elenga H., Vincens A., Bertaux J., Mariotti A., Achoundong G., Alexandre A., Belingard C., Girardin C., Guillet B., Maley J., de Namur C., Reynaud-Ferrara I. & Youta Happi J., 2000, *Origine et évolution des savanes des marges forestières en Afrique Centrale Atlantique (Cameroun, Gabon, Congo): approche au échelles millénaires et séculaires*, pp 325-338. In Servant M. et Servant-Vildary S. (Editors) *Dynamique à long terme des écosystèmes forestiers intertropicaux*, UNESCO, Paris, 434 p.
45. Servant M., 2000, *Diversité actuelle de la forêt tropicale et changements passés du climat: le programme écosystèmes et paléoécosystèmes des forêts Intertropicales (ecofit). Bilan et perspectives*, pp 13-18. In: Servant M. & Servant-Vildary S. (Editors) *Dynamique à long terme des écosystèmes forestiers intertropicaux*, UNESCO, Paris, 434 p.
46. Spichiger R. & Lassailly V., 1981, Recherches sur le contact forêt-savane en Côte d'Ivoire: note sur l'évolution de la végétation dans la région de Béoumi (Côte d'Ivoire centrale), *Candollea*, **36**, 145-153.
47. Swaine M.D., Hall J.B. & Lock J.M., 1976, The forest-savanna boundary in West-Central Ghana, *Ghana J. Sci.*, **16**, 35-52.
48. Townshend J.R.G. & Justice C.O., 1986, Analysis of the dynamics of African vegetation using the NDVI. *Int. J. Remote Sens.*, **7**, 1435–1446
49. Tucker C.J., Pinzon J.E., Brown M.E., Slayback D.A., Pak E.W., Mahoney R., Vermote E.F. & Saleous N.E., 2005, An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data, *Int. J. Remote Sens.*, **26**, 4485–4498.
50. Zhang J., Zhang L., Xu C., Liu W., Qi Y. & Wo X., 2014, Vegetation variation of mid-subtropical forest based on MODIS NDVI data — A case study of Jinggangshan City, Jiangxi Province. *Acta Ecologica Sinica*, **34**, 7-12.