AgroParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET INDUSTRIES DU VIVANT ET DE L'ENVIRONNEMENT
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY FOR LIFE, FOOD AND ENVIRONMENTAL SCIENCES

cirad
LA RECHERCHE AGRONOMIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT

TETIS

MEMOIRE DE STAGE DE FIN D'ETUDES
Présenté en vue de l'obtention du titre Master II Master 3A
Spécialité Gestion Environnementale des Ecosystèmes et Forêts Tropicales (GEEFT)
2011 – 2012

ANALYSE DE LA DYNAMIQUE DE LA PRODUCTION VEGETALE EN LIEN AVEC LE CLIMAT EN AFRIQUE DE L'OUEST (2002-2011) PAR TELEDETECTION SATELLITAIRE

Source : Google Earth

Mémoire soutenu par :
Diana Alexandra LARA LOPEZ
Le 24/10/2012 à Montpellier

Jury :
Maître de stage : Mme. Agnès BEGUE
Tuteur : M. Georges SMEKTALA
Expert externe : M. Danny LO SEEN

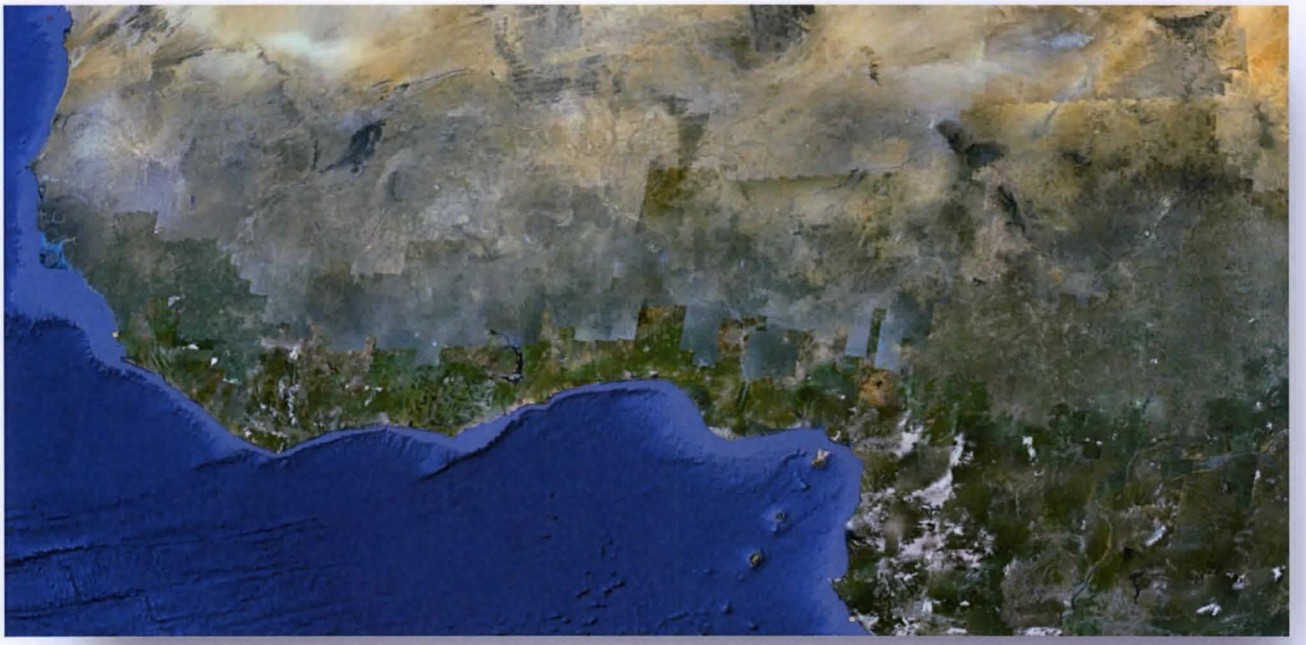
AgroParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET INDUSTRIES DU VIVANT ET DE L'ENVIRONNEMENT
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY FOR LIFE, FOOD AND ENVIRONMENTAL SCIENCES

cirad
LA RECHERCHE AGRONOMIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT

TETIS

MEMOIRE DE STAGE DE FIN D'ETUDES
Présenté en vue de l'obtention du titre Master II Master 3A
Spécialité Gestion Environnementale des Ecosystèmes et Forêts Tropicales (GEEFT)
2011 – 2012

ANALYSE DE LA DYNAMIQUE DE LA PRODUCTION VEGETALE EN LIEN AVEC LE CLIMAT EN AFRIQUE DE L'OUEST (2002-2011) PAR TELEDETECTION SATELLITAIRE



Source : Google Earth

Mémoire soutenu par :
Diana Alexandra LARA LOPEZ
Le 24/10/2012 à Montpellier

Jury :
Maître de stage : Mme. Agnès BEGUE
Tuteur : M. Georges SMEKTALA
Expert externe : M. Danny LO SEEN

Résumé

La sécurité alimentaire reste un sujet d'actualité en Afrique de l'Ouest. La définition des bassins de production ou de paysages homogènes est l'un des principaux points de départ pour la réalisation de notre objectif qui est d'analyser la dynamique des surfaces végétales et agricoles en lien avec le climat notamment la pluviométrie en Afrique de l'ouest sur les dix dernières années, à partir des séries temporelles d'images à moyenne résolution spatiale.

Les images MODIS ont été compilées sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest entre 2002 et 2011. Deux produits ont été utilisés dans cette étude : le produit MOD13A1, notamment la bande de synthèse 16 jours de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) et la bande de qualité (*pixel reliability*), et le produit MCD12Q1, à partir duquel nous avons extrait la bande *Land Cover Type 1.* Les deux produits ont une résolution spatiale de 500 mètres. Les images ont été prétraitées avec les logiciels Erdas et ENVI. L'analyse des tendances a été menée en deux temps : segmentation de l'espace régional et analyse des tendances de chaque segment.

Plusieurs segmentations ont été faites avec le logiciel eCognition. La qualité de ces segmentations a été évaluée de façon non supervisée à partir d'indicateurs statistiques issus de la bibliographie qui prennent en compte l'homogénéité intra-région et l'hétérogénéité inter-région. Les paramètres de segmentation les plus appropriés pour notre zone d'étude, sont : paramètres d'échelle : 500 ; critère de forme : 0.7 ; critère de compacité : 0.9.

L'analyse de tendances de la production végétale a été menée en traçant une régression linéaire entre le NDVI moyen annuel et les années pour chaque segment de l'espace sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest pendant les 10 ans. Nous avons trouvé une tendance du NDVI à la diminution de 20% de l'ensemble de la zone, à la stagnation de 72% et à l'augmentation de 8%.

L'analyse géographique des résultats montre que le Sénégal, la Mauritanie et le Mali sont les pays les plus touchés par une augmentation du NDVI (respectivement 35%, 24% et 18% de la surface du pays), alors que la République démocratique du Congo, la Guinée équatoriale et le Sierre Leone montrent une forte baisse du NDVI moyen sur la période avec respectivement 63%, 61% et 50% du territoire concerné.

A partir de la segmentation, une analyse des tendances de la pluviométrie a été menée avec la même méthode en utilisant des données satellitaires RFE de cumul pluviométrique. Les pays qui montrent une tendance à la diminution de la pluviométrie sont principalement la Guinée équatoriale, le Nigeria, le Gabon et le Cameroun (respectivement 42%, 37%, 31% et 21%). En revanche, on observe une augmentation de la pluviométrie dans le sud soudanien et guinéen, et l'on n'observe aucune tendance dans le nord sahélien.

Une régression linéaire entre les valeurs moyennes de NDVI et les précipitations ont été calculées, en obtenant une corrélation de 0,52 pour la zone soudano-sahélienne, et de 0.23 pour la zone guinéenne. Ces résultats sont sans surprise, et confirment que dans le sud de la zone d'étude, la pluie n'est pas un facteur limitant de la production végétale. Finalement, les pays avec la plus forte augmentation des surfaces agricoles sont le Nigeria, le Burkina Faso et le Sénégal (17%, 6% et 5% respectivement), et ceux qui ont la plus forte diminution sont le Ghana et le Cameroun (9%, 5%).

Abstract

Food security remains a hot topic in West Africa. The definition of production areas or homogeneous landscapes is one of the main starting points for achieving our objective which consists on analyzing the dynamics of plant and agricultural surfaces related to climate, especially rainfall in West Africa over the last ten years, from the time series of medium spatial resolution images.

MODIS images have been compiled on the entire West Africa between 2002 and 2011. Two products were used in this study: the MOD13A1 product, including a synthesis band of 16 days NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and a quality band (pixel reliability); and the product MCD12Q1, from which the Land Cover Type 1 band has been used. Both products have a spatial resolution of 500 meters. The images were preprocessed with the software Erdas and ENVI. Trend analysis was conducted in two stages: a first regional space segmentation was performed and the analysis of trends in each segment was extracted.

Several segmentations have been made with the eCognition software. The quality of the segmentation was evaluated from unsupervised statistical indicators from the literature that take into account the intra-region homogeneity and the inter-region heterogeneity. From the previous analysis the best segmentation parameters were: scale parameter: 500; shape: 0.7; compactness: 0.9.

The analysis of trends in vegetal production was conducted by plotting the average values of NDVI in each segment for the different years. A decreasing trend was found in 20% of the area, a stagnation in 72% of the area and an increasing trend in the resting 8%.

The geographical analysis of the results shows that Senegal, Mauritania and Mali are the most affected countries by an increase in NDVI (35%, 24% and 18% of the country's surface), while the Democratic Republic of Congo, Equatorial Guinea and Sierra Leone show a sharp decline in the average NDVI (63%, 61% and 50% of the territory).

From the segmentation, trend analysis of rainfall was conducted with the same method using satellite data RFE rainfall accumulation. Countries that show a decreasing trend in rainfall are mainly Equatorial Guinea, Nigeria, Gabon and Cameroon (42%, 37%, 31% and 21%). In contrast, we observed an increase in rainfall in the southern Sudanese and Guinean and there is no trend in the northern Sahel.

A linear regression between average values of NDVI and rainfall was calculated, obtaining a correlation of 0.52 for the Sudano-Sahelian zone, and 0.23 for the Guinean zone. These results are not surprising and confirm that in the south of the study area, rainfall is not a limiting factor for crop production. Moreover, the relation between the trend of NDVI and agricultural extent in each segment were analyzed, however the correlation obtained was not satisfactory, making necessary to add other variables such as crop yields. Finally, countries with the highest increase of agricultural land are Nigeria, Burkina Faso and Senegal (17%, 6% and 5% respectively), and those with the largest decrease are Ghana and Cameroon (9 %, 5%).

Resumen

La seguridad alimentaria es un tema polémico en Africa del Oeste. La definición de las áreas de producción o paisajes homogéneos es uno de los principales puntos de partida para el logro de nuestro objetivo el cual se centra en analizar la dinámica de la superficie vegetal y agrícola en relación con el clima especialmente la precipitación en África del Oeste durante los últimos diez años, utilizando series temporales de imágenes de media resolución espacial.

Imágenes MODIS fueron compiladas en toda África del Oeste entre 2002 y 2011. Dos productos fueron utilizados en este estudio: el producto MOD13A1, especialmente la banda de NDVI (Índice de Vegetación Normalizado) que esta conformada por una síntesis de 16 días y la banda de calidad (*pixel reliability*), el segundo producto MCD12Q1, del cual se utilizó la banda 1 que contiene el uso y cobertura de la tierra. Ambos productos tienen una resolución espacial de 500 metros. Las imágenes fueron pretratadas, con los programas Erdas y ENVI. Análisis de tendencias fueron realizados en dos etapas: la segmentación del espacio regional y el análisis de las tendencias de cada segmento.

Segmentaciones múltiples se realizaron con el software eCognition. La calidad de la segmentación se evaluó de forma no supervisada y a partir de indicadores estadísticos encontrados en la literatura tomando en cuenta la homogeneidad intra-región y la heterogeneidad inter-región. Los parámetros de segmentación más relevantes para nuestra área de estudio fueron los siguientes: parámetro de escala: 500; criterio forma: 0,7; criterio de compacidad: 0.9.

El análisis de las tendencias en la producción agrícola se realizó mediante regresión lineal entre el NDVI medio anual por segmento durante el periodo de 10 años en toda África del Oeste. Así se encontró una tendencia a la disminución de NDVI de 20%, el 72% se mantuvo se mantuvo estable y un aumento del 8% de la superficie total.

El análisis geográfico de los resultados muestra que Senegal, Mauritania y Malí son los países con el aumento de NDVI más alto (35%, 24% y 18% de la superficie del país respectivamente), mientras que República Democrática del Congo, Guinea Ecuatorial y Sierra Leona muestran una fuerte disminución en el NDVI promedio durante el período, con el 63%, 61% y 50% del territorio.

A partir de la segmentación, el análisis de tendencia de precipitación se llevó a cabo con el mismo método utilizando imágenes de satélite RFE que contienen datos de precipitación acumulada. Los países que muestran una tendencia a la disminución de las precipitaciones son principalmente de Guinea Ecuatorial, Nigeria, Gabón y Camerún (42%, 37%, 31% y 21% respectivamante). Por el contrario, se observó un aumento de las precipitaciones en el sur de la zona sudaneana y guineana y estabilización el norte del Sahel.

Una regresión lineal entre los valores medios de NDVI y las precipitaciones se calcularon, obteniendo un R^2 de 0,52 para la zona sudano saheliana, y 0,23 para la zona guineana. Estos resultados no son sorprendentes y confirman que en el sur del área de estudio, la precipitación no es un factor limitante para la producción agrícola. Por último, los países con el mayor aumento de las tierras agrícolas son Nigeria, Burkina Faso y Senegal (17%, 6% y 5% respectivamente), y los países con mayor descenso fueron Ghana y Camerún (9 %, 5% respectivamente).

Remerciements

Je tiens tout d'abord remercier mon maître de stage Agnès Bégué pour le temps et l'énergie qu'elle a su me consacrer durant ces six mois de stage. Je la remercie pour sa patience, aptitudes pédagogiques, dévouement et son soutien constant. Je considère un vrai privilège avoir pu apprendre de son côté et avec l'espoir d'utiliser et également transmettre toutes les connaissances acquis et de grand valeur dans ma vie professionnelle. Merci également de m'avoir aidé à mener à bien ce travail et de répondre à toutes mes questions d'une manière très claire et très cordiale.

Je remercie également :

- M. Georges Smektala mon tuteur pour sa disponibilité et ses conseils.

- M. Danny Lo Seen pour ses importantes remarques et son temps au début et à la fin de mon stage.

- Mar Bisquert pour ses explications et des conseils opportuns dans des discussions quotidiennes et un grand soutien dans l'amélioration de l'efficacité et de la performance de mon travail toujours dans une ambiance très sympathique et de bonne humeur.

- Je remercie les amis de stage notamment les Jeannettes et Sergios avec qui j'ai partagé des expériences très enrichissantes pour la vie professionnelle et personnelle et qui ont fait le travail à la MTD très agréable.

- Immensément reconnaissant à ma famille et mes amis en Colombie qui étaient présents à cœur malgré la distance, toujours en m'appuyant et souhaitant tout le succès lors de mon séjour en France.

Je remercie plus généralement l'ensemble des personnes de la Maison de la Télédétection pour leur accueil, leur sympathie et l'ambiance générale de travail et de convivialité.

Enfin je remercie au CIRAD pour m'avoir donné également l'opportunité privilège et me permettre de travailler et apprendre avec les meilleurs chercheurs qui appartiennent à son équipe.

Table des matières

Résumé
Abstract
Remerciements
Liste des Figures
Liste des Tableaux
Liste des Annexes
INTRODUCTION 1
1. PROBLEMATIQUE 3
1.1 Du point de vue humain et social 3
2. MATERIEL ET METHODES 4
2.1 Description de la zone d'étude 4
2.1.1 Localisation 4
2.1.2 Climat 4
2.1.3. Systèmes agricoles et facteurs limitant 5
2.2 Acquisition des données 6
2.2.1. Acquisition des produits MODIS 6
2.2.2. Acquisition des données pluviométriques 9
2.3. Méthodologie 11
2.3.1. Prétraitement des images 11
2.3.2.. Segmentation et extraction des attributs radiométriques et environnementaux (climat) par région 13
2.3.3. Analyses spatio – temporelle de la production végétale avec le climat 15
3. RESULTATS ET DISCUSSION 20
3.1. Evaluations des segmentations 20
3.2 Analyses de Tendances 21
3.2.1. Analyses de Tendances de NDVI 21
3.2.2. Analyses de tendance de la pluviométrie 25
3.3. Analyse conjointe de la dynamique spatiotemporelle NDVI – Pluviométrie sur l'ensemble du territoire 27
3.4. Analyse conjointe de la dynamique spatiotemporelle NDVI – Pluviométrie sur le domaine cultivé 29
3.5. Analyses de surfaces agricoles 31
3.6. Analyse des tendances de production 34
4. CONCLUSION 35
5. RECOMMANDATIONS 36
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 37
ANNEXES 39

Liste des Figures

Figure 1. Délimitation approximative de la zone d'étude en Afrique de l'Ouest. Source carte : (www.unep.org) 4
Figure 2. Carte de variabilité de la précipitation en Afrique. Source. (www.unep.org) 4
Figure 3. Bassins de production mil, maïs et sorgho en Afrique de l'Ouest. (Bricas 2009) 5
Figure 4. Bassins de production de manioc et d'igname en Afrique de l'Ouest. (Bricas 2009) 5
Figure 5. Facteurs de croissance des productions vivrières en fonction des pays (Bricas, 2009) 6
Figure 6 MODIS Sinusoidal Tiling System. Source : (https://lpdaac.usgs.gov 2012b) 7
Figure 7. SCHEMA GENERAL DE LA METHODOLOGIE 10
Figure 8. . Exemples d'images mensuelles mosaïquées 11
Figure 9. Comparaison avant et après mosaîquage des images synthèse par mois des 5 dernières années 12
Figure 10. Les paramètres de la segmentation multi-résolution. (Formation continue UMR TETIS AgroParisTech. 2009) 14
Figure 11. Champs crées sur ERDAS pour l'analyses de tendance 16
Figure 12. Base de données du fichier dbf. de sortie créé par le logiciel « R » pour l'analyse des tendances. 16
Figure 13. Masque de culture à partir du produit MCD12Q1 2002 17
Figure 14. Masque de culture à partir du produit MCD12Q1 2008 17
Figure 15. Zonage nord et sud dans la zone d'étude pour l'analyse de corrélation 19
Figure 16. Indices d'évaluation des différentes segmentations testées. 20
Figure 17. Trois meilleures segmentations selon le test de Zhang. 21
Figure 18. Exemples de tendances de NDVI calculées avec R à l'échelle du segment, entre 2002 et 2011. Les titres en noir correspondent à une évolution non significative au seuil de 10%, alors que , les ceux en vert et rouge correspondent à une augmentation et une diminution du NDVI respectivement. 22
Figure 19. Carte de tendance de NDVI entre 2002 et 2011 avec paramètre d'échelle: 500, critère de forme: 0.7 et critère de compacité: 0.9. 22
Figure 20. Carte de tendance de NDVI entre 2002 et 2011 avec paramètre d'échelle: 400, critère de forme: 0.7 et critère de compacité: 0.9. 23
Figure 21. Carte de tendance de NDVI entre 2002 et 2011 avec paramètre d'échelle: 300, critère de forme: 0.7 et critère de compacité: 0.9. 23
Figure 22. Exemples de tendances de pluviométrie calculées avec R à l'échelle du segment, entre 2002 et 2011. Les titres en noir correspondent à une évolution non significative au seuil de 10%, alors que, les ceux en vert et rouge correspondent à une augmentation et une diminution du NDVI respectivement. 25
Figure 23. Carte de tendance de Pluie entre 2002 et 2011 26
Figure 24. Dynamique moyenne interannuelle de la pluviométrie et du NDVI – Zone Nord 27
Figure 25. . Corrélation entre les tendances de la pluviométrie et celle du NDVI par région dans la zone Nord. 27
Figure 26. Dynamique moyenne interannuelle de la pluviométrie vs NDVI – Zone Sud 28
Figure 27. Analyse de corrélation des tendances de pluviométrie vs les tendances de NDVI par région dans la zone Sud 28
Figure 28. Analyse de corrélation de pluviométrie vs NDVI moyenne par région dans la zone Nord 28
Figure 29. Analyse de corrélation de pluviométrie vs NDVI moyenne par région dans la Zone Sud 29
Figure 30. Analyse de corrélation de la pluviométrie et le NDVI dans des zones cultivées 30

Figure 31. Corrélation entre les tendances de la pluviométrie et celle du NDVI dans des zones cultivées 30
Figure 32. Carte de pourcentage de surface cultivée par région en 2002 31
Figure 33. Carte de pourcentage de surface cultivée en région en 2008 31
Figure 34. Carte de pourcentage d'évolution des cultures par région entre 2002 et 2008 32

Liste des Tableaux

Tableau 1. Caractéristiques du produit Végétation Indices 16-Day L3 Global 500m (MOD13A1). 7
Tableau 2. Caractéristiques du produit Land Cover Type MCD12Q1 8
Tableau 3. Caractéristiques du produit RFE 2.0. 9
Tableau 4. Paramétres de segmentations testés. 14
Tableau 5. Résultats de test de validation en utilisant l'indice de Zhang et al. 2012 20
Tableau 6. Comparaison de tendances de NDVI par segmentation 24
Tableau 7. Tendance du NDVI par rapport à la surface (ha) par pays dans la zone d'étude 24
Tableau 8. Tendance de la pluviométrie par rapport à la surface (ha) par pays dans la zone d'étude ... 26
Tableau 9. Tendance du NDVI sur le domaine cultivée (ha) par pays 30
Tableau 10. Pourcentage d'évolution des cultures entre 2002 et 2008 par classe 32
Tableau 11. Pourcentage d'évolution des cultures par pays 33
Tableau 12. Pays en Afrique de l'Ouest avec plus de dynamique agricoles par groupe de produits 33
Tableau 13. Comparaison des résultats de tendances dans le domaine cultivé avec des statistiques nationales de l'AFD 34

Liste des Annexes

Annexe 1. MOD13A1 Pixel Reliability 39
Annexe 2. Script R pour le calcul de tendances 39
Annexe 3. Script IDL pour syntheses des images de NDVI 41
Annexe 4. Tableau général de nombre de jours de l'année du produit MOD13A1 par an 42
Annexe 5. Résultat de test de la méthode Zhang en utilisant deux différents logiciels. 43

Liste des abréviations et acronymes

- ✓ AFD : Agence Française de Développement
- ✓ AMSU: *Advanced Microwave Sounding Unit*
- ✓ ATTOS : Acquisition, Télédétection, Traitement et Observations Spatiales.
- ✓ CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
- ✓ MODIS: *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*
- ✓ NDVI: *Normalized Difference Vegetation Index*
- ✓ NOAA: *National Oceanic and Atmospheric Organisation*
- ✓ IRSTEA : Institute national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture.
- ✓ PIR : Proche Infrarouge
- ✓ RFE: *Rainfall Estimate*
- ✓ SSM/I: *Special Sensor Microwave/Imager*
- ✓ TETIS : Territoire, Environnement, Télédétection et Information Spatiale
- ✓ UMR : Unité Mixte de Recherche
- ✓ USGS: *United States Geological Survey*

INTRODUCTION

Les dynamiques de production agricole d'un pays ou d'une région sont liées à l'évolution des surfaces cultivées et des rendements. A l'échelle de l'Afrique de l'Ouest, il existe une controverse sur la composante « rendement » de la dynamique de la production agricole. S'il est souvent admis qu'une intensification a lieu dans plusieurs régions sur des productions particulières (maïs dans la zone de culture du coton), deux visions s'affrontent quant à l'évolution des rendements des céréales sahéliennes (mil, sorgho).

A partir des données statistiques nationales, nous observons une croissance du rendement en Afrique de l'Ouest; a contrario, les analyses des agronomes de nombreux terrains et de diverses disciplines mettent en évidence une stagnation des rendements. En outre, des enquêtes faites auprès d'un millier d'exploitations à travers la zone soudano-sahélienne montrent que la perception des agriculteurs est la baisse des productions au cours des 20 dernières années.

Dans ce contexte, il est intéressant d'analyser des séries temporelles d'images de télédétection pour évaluer spatialement la dynamique de la production végétale au cours des 10 dernières années à partir de séries temporelles d'images à résolution spatiale modérée.

Il est connu depuis longtemps que les indices de végétation dérivés des données satellitaires sont de bons indicateurs de la production végétale, végétation naturelle et culture confondues.

Des techniques d'analyse de tendance des indices de végétation au cours du temps permettent d'étudier en tout point du territoire les tendances au « verdissement » ou à la dégradation de la production végétale. Ces tendances peuvent être « corrigées » des effets de la variabilité interannuelle de la pluviométrie par des techniques éprouvées. Toutefois, il peut être montré que la productivité répond aux précipitations, l'impact de l'évolution des précipitations devrait, en principe, être séparée des autres impacts en incluant les facteurs humains (Fensholt & K. Rasmussen 2011)

Dans cette étude on analyse la variabilité interannuelle de NDVI en lien avec la variabilité des précipitations et l'évolution de l'occupation du sol agricole, à une échelle macro, sur une période de dix ans.

Cette analyse de tendances est faite à l'échelle de paysages radiométrique homogènes issus d'un processus de segmentation. Ces régions sont ensuite considérées comme des individus munis d'attributs multiples (López-Ornelas E. et al. 2005)

L'objectif de ce projet est de définir des bassins de production en Afrique de l'Ouest à partir de séries d'images satellite acquises à résolution spatiale modérée, et ensuite de relier la dynamique de végétation de ces bassins à la dynamique de la pluviométrie sur la même période.

Pour atteindre cet objectif, nous proposons un travail en 3 temps :

- Dans un premier temps, par processus de segmentation il sera possible d'obtenir différents « paysages végétaux» de l'Afrique de l'Ouest à partir de séries temporelles d'images satellitaires (zonages de tendances).

- Dans un deuxième temps, une analyse de tendance de NDVI plus poussée sera faite en lien avec les données pluviométriques pour voir quelle part de la dynamique de la végétation peut être expliquée par les variations climatiques.
- Enfin, nous analyserons l'évolution des surfaces cultivées et ensuite nous comparerons ces résultats avec ceux issues des tendances du NDVI, en contrastant avec des statistiques nationales.

De même, ils ont été posées les questions et les hypothèses suivantes :

Question générale	Questions spécifiques	Hypothèses
Quelle est la dynamique de la production végétale en lien avec le climat en Afrique de l'Ouest les dix dernières années?	*Comment stratifier la région en paysages radiométriques homogènes ?*	*Parmi processus de segmentation il est possible d'obtenir paysages homogènes de NDVI bien délimités*
		Le NDVI est un indicateur de production de biomasse végétale.
		La production agricole est liée à la production de biomasse.
	Quelle est l'effet du climat, notamment la pluviométrie, sur la dynamique des principaux bassins de production en Afrique de l'Ouest?	*La pluviométrie est un déterminant clé de la production végétale en Afrique de l'Ouest.*
		Les autres déterminants de la production végétale (intensification/dégradation) ne peuvent être étudiés qu'après avoir éliminé l'effet climat sur la production

Le stage s'est déroulé à Montpellier au sein de l'Unité Mixte de Recherche TETIS (Territoire, Environnement, Télédétection et Information Spatiale) AgroParisTech-IRSTEA-CIRAD, et plus précisément dans, l'équipe ATTOS (Acquisition, Télédétection, Traitement et Observations Spatiales). « L'équipe ATTOS développe des techniques et des méthodes permettant de détecter, identifier, caractériser et suivre les surfaces et objets structurants des systèmes agro-environnementaux et des territoires, à partir de données aérospatiales » (TETIS 2012)

1. PROBLEMATIQUE

La production agricole est un des piliers de la sécurité alimentaire, et il est important de pouvoir quantifier cette production dans le temps et dans l'espace, en particulier dans les pays dits « à risque », où les statistiques nationales manquent souvent d'objectivité.

La commande s'inscrit avant tout dans une démarche de développement méthodologique, pour analyser les principaux facteurs influençant la dynamique agricole spatio–temporelle, à partir d'observations satellitaires. Les résultats thématiques issus de ce travail devraient permettre d'alimenter la réflexion sur la sécurité alimentaire en Afrique de l'Ouest. Ce thème, très important pour le CIRAD devrait être traité dans le cadre d'une Action Thématique Programmée (ATP) CIRAD en cours de montage.

Par ailleurs, ce stage s'encadre en concordance avec l'axe six du CIRAD « Mieux comprendre les relations entre l'agriculture et l'environnement et entre les sociétés humaines et la nature, pour gérer durablement les espaces ruraux ».

1.1 Du point de vue humain et social

En Afrique de l'Ouest les hauts indices de pauvreté sont à l'origine de l'augmentation la mortalité et du manque de la couverture des besoins alimentaires de base. « Plus de 850 millions de personnes sont actuellement sous-alimentées, en particulier en Asie et en Afrique subsaharienne, où environ un tiers de la population est sous-alimentée » (FAO 2007).

La recherche et l'analyse des facteurs qui permettent de connaitre la dynamique agricole peut être un outil pour améliorer les politiques publiques et la façon de gérer les ressources disponibles dans le temps et dans l'espace.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1 Description de la zone d'étude

2.1.1 Localisation

La zone d'étude choisie est l'Afrique de l'Ouest sub-saharienne, qui comporte les pays Bénin, Burkina Faso, Côte d'Ivoire, Gambie, Ghana, Guinée, Guinée-Bissau, Libéria, Mali, Niger, Nigeria, Sénégal, Sierra Leone et Togo, ainsi que la Mauritanie, le Tchad et le Cameroun, et dont les coordonnées géographiques de la région d'étude désignée sont : coin sud-ouest Latitude 1°39'N Longitude 17°32'O et coin nord-est Latitude 16°32'N Longitude 23°59'E (Figure 1) .

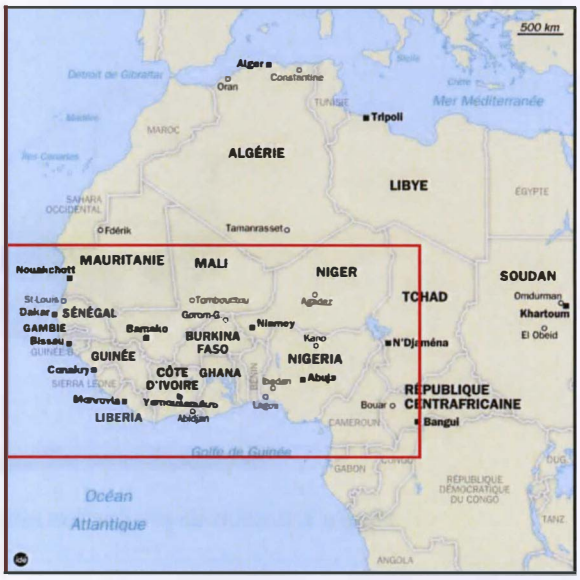


Figure 1. Délimitation approximative de la zone d'étude en Afrique de l'Ouest. Source carte : (www.unep.org)

Cette région héberge une population en croissance rapide (240 millions pour Afrique de l'Ouest, 800 millions pour l'ensemble du continent en 2000), et une très grande diversité des écosystèmes allant de forêts tropicales à des savanes, les prairies et le désert (Delire et al. 2008).

2.1.2 Climat

Une des principales caractéristiques de l'Afrique de l'Ouest c'est la saisonnalité du régime des précipitations (Figure 2). Le phénomène de mousson permet l'installation de deux saisons des pluies en zone guinéenne et une seule saison dans le domaine sahélien (juin-septembre) ; les conséquences de cette répartition sont l'existence d'un fort gradient Nord Sud du cumul annuel des précipitations et une forte variabilité (Tracol 2004).

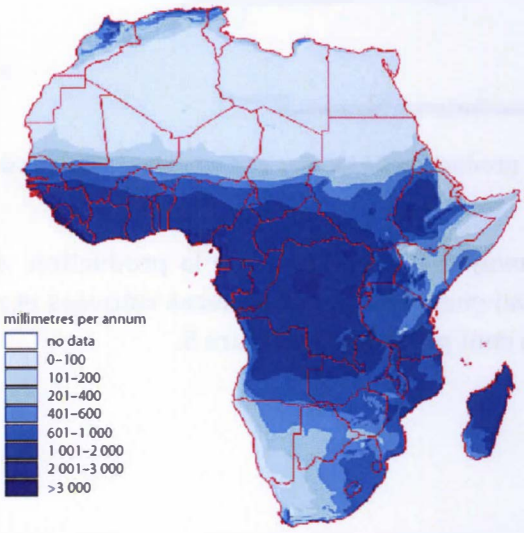


Figure 2. Carte de variabilité de la précipitation en Afrique. Source. (www.unep.org)

2.1.3. Systèmes agricoles et facteurs limitant

En Afrique de l'Ouest on différencie généralement deux groupes de productions agricoles. Le premier groupe est composé des céréales (mil, sorgho, maïs et riz), et le deuxième groupe correspond aux tubercules (manioc et igname) . Les bassins de production de ces deux groupes ont été cartographiés par Bricas et al. (2009) et sont représentés en Figure 3 et Figure 4.

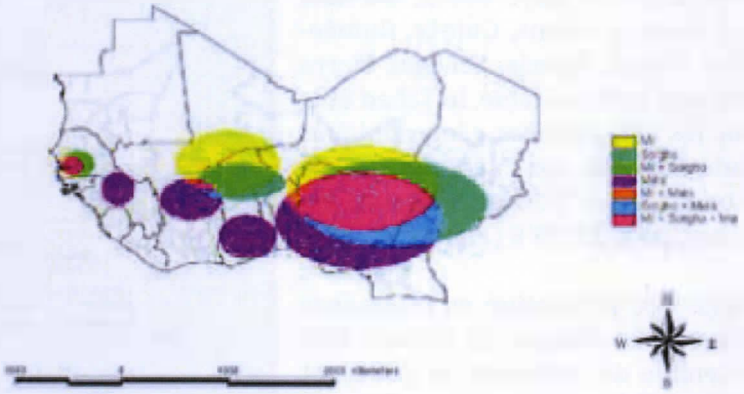


Figure 3. Bassins de production mil, maïs et sorgho en Afrique de l'Ouest. (Bricas 2009)

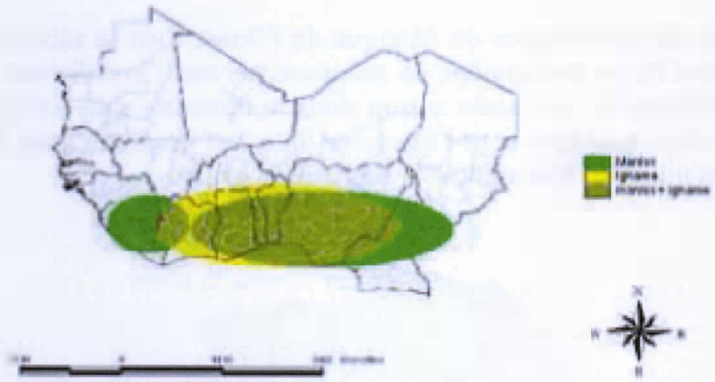


Figure 4. Bassins de production de manioc et d'igname en Afrique de l'Ouest. (Bricas 2009)

Bricas et al. (2009) ont analysé la dynamique de la production de ces différents groupes en décomposant la part due au changement des surfaces cultivées et celle due à la dynamique des rendements. Les résultats sont présentés en Figure 5.

Céréales

Stagnation de la production	Accroissement de la production tiré par l'extension des surfaces	Accroissement de la production tiré par la hausse des rendements
Ghana, Mauritanie (sauf riz).	Gambie, Sénégal (sauf pour le riz), Mali, Burkina Faso (sauf pour le mil), Tchad, Guinée, Cameroun (sauf pour le mil et le sorgho).	Togo, Nigeria, Côte d'Ivoire, Guinée Bissau, Sierra Leone (sauf pour le riz), Bénin (sauf pour le maïs) et Niger (sauf pour le maïs).

Tubercules

Accroissement de la production tiré par l'extension des surfaces	Accroissement de la production tiré par la hausse des rendements
Pays où seule la hausse des surfaces cultivées intervient : Nigeria, Sierra Leone, Libéria, Ghana, Guinée Bissau. Pays où la hausse des surfaces cultivées s'accompagne d'une légère hausse des rendements : Cameroun, Togo et Benin.	Pays sahéliens (Sénégal, Mali, Burkina Faso, Niger et Tchad), Guinée et Côte d'Ivoire.

Arachide et Niébé

Stagnation de la production	Accroissement de la production tiré par l'extension des surfaces	Accroissement de la production tiré par la hausse des rendements
Mauritanie, Sénégal, Côte d'Ivoire, Togo et Guinée Bissau.	Arachide : Sud Mauritanie, Mali, Burkina, Tchad, Ghana, Gambie, Libéria et Sierra Leone. Niébé : pays du Sahel (sauf Mali et Niger où les rendements sont en hausse).	Guinée, Mali, Niger, Nigeria et Bénin.

Figure 5. Facteurs de croissance des productions vivrières en fonction des pays (Bricas, 2009)

2.2 Acquisition des données

2.2.1. Acquisition des produits MODIS

Les images satellitaires utilisées dans ce travail sont des images acquises par le capteur MODIS à bord des satellites TERRA. Dix années de données ont été traitées dans cette étude (2002-2011).

A l'origine les produits MODIS ont un format .hdf (où il est possible de stocker plusieurs bandes d'information dans un même fichier) et la projection des produits MODIS est *Sinusoïdal*. Les produits ont été reprojetés dans un système de coordonnées géographiques (WGS 84) pour assurer la compatibilité avec la majorité des couches SIG.

Les images ont été traitées sous le logiciel Erdas et ENVI pour améliorer leur qualité et composer des scènes mosaïquées.

Dans un premier temps ont été choisies les tuiles qui correspondent à la zone d'intérêt sur l'ensemble des images MODIS où les lignes sont définies par la lettre « v » et les colonnes par la lettre « h » (Figure 6).

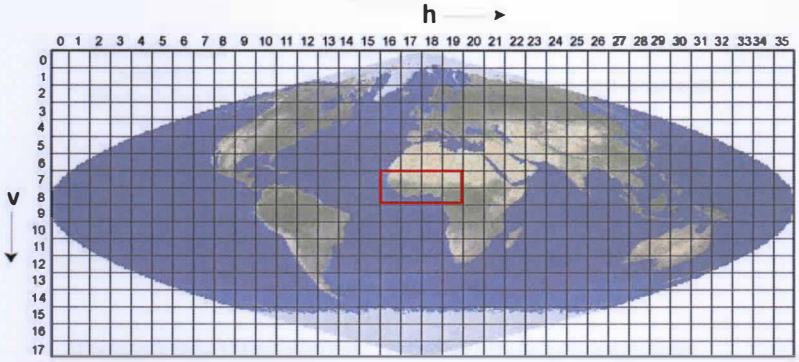


Figure 6 MODIS Sinusoidal Tiling System. Source : (https://lpdaac.usgs.gov 2012b)

La zone d'étude occupe 8 tuiles. Nous avons téléchargé à partir du site d'internet https://lpdaac.usgs.gov/ deux types de produits MODIS sur chaque tuile :

- Le produit Indice de végétation MOD13A1
- Le produit d'Occupation du sol MCD12Q1

3.2.1.1 Le produit NDVI MOD13A1

Le produit MOD13A1 fournit sur l'ensemble du globe des synthèses d'indice de végétation (NDVI et EVI) au pas de 16 jours et à 500 m de résolution. Les principales caractéristiques du produit Végétation Indices 16-Day L3 Global 500m (MOD13a1) sont données dans le Tableau 1. Les bandes du produit MOD13A1 sont données en Annexe 1. Dans cette étude, nous avons utilisé la bande 1, qui correspond à l'indice de végétation NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), et la bande 12 qui est le « pixel reliability » soit un indicateur de qualité du NDVI.

Tableau 1. Caractéristiques du produit Végétation Indices 16-Day L3 Global 500m (MOD13A1).

Caractéristique	Description
Date d'acquisition	Janvier 2002 - Décembre 2011
Surface par tuile	~1200km*1200km (~10 * 10 lat/long)
Projection	Sinusoïdal
Format de données	HDF-EOS
Dimensions	2400 * 2400 lignes/colonnes
Résolution spatiale	500 mètres
Résolution temporelle	16 jours
Satellite	Terra

L'indice de végétation NDVI (1) (*Normalized Difference Vegetation Index*), proposé par Rouse et al. (1973), s'obtient à partir de la différence de la réflectance dans le proche infrarouge et le rouge divisée par leur somme.

$$NDVI = \left(\frac{PIR - R}{PIR + R}\right) \quad (1)$$

La végétation réfléchit fortement dans la plage de 0,7 à 0,9 µm (proche infrarouge) et peu dans la plage de 0,6 à 0,7 µm (rouge) en raison de l'absorption par la chlorophylle. Ainsi la différence normalisée entre ces deux bandes est-elle un bon indicateur de l'activité photosynthétique des surfaces, et, par extension, de la production de biomasse.

Au total 230 images ont été téléchargées (23 * 10 ans).

3.2.1.2. Le produit Occupation du sol MCD12Q1

Le produit *« Land Cover Type »* MCD12Q1 (Tableau 2) propose plusieurs systèmes de classification d'occupation du sol (https://lpdaac.usgs.gov 2012a). Ce produit est fourni annuellement avec une résolution de 500 m.

Dans cette étude, ce produit est utilisé pour faire les masques des cultures sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest pour les années 2002 et 2008. Ces années ont été choisies pour faire une comparaison plus proche aux résultats obtenus par l'AFD, qui ont été entre 2000 et 2008. Nous avons utilisé la bande Land Cover Type 1 (IGBP). « Le schéma de couverture des terres primaire identifie 17 classes de couverture terrestre définis par le *International Geosphere Biosphere Programme (IGBP),* qui comprend 11 classes de végétation naturelle, 3 classes de terres développées et mosaïquées *(3 developed and mosiacked land classes),* et 3 classes de terrain sans végétation »(https://lpdaac.usgs.gov 2012).

A partir des 17 classes d'occupation du sol, nous avons retenu les classes #12 (Culture/*Croplands*) et #14 (Culture - *Cropland/* Mosaïque de végétation naturelle - *Natural végétation mosaic*) pour faire les masques correspondants aux années 2002 et 2008.

Tableau 2. Caractéristiques du produit Land Cover Type MCD12Q1

Caractéristique	Description
Date d'acquisition	2002 et 2008
Surface par tuile	~1200*1200 km (~10^0*10^0 lat/long)
Projection	Sinusoïdal
Format de données	HDF-EOS
Dimensions	2400 * 2400 lignes/colonnes
Résolution spatiale	500 mètres
Résolution temporaire	1 an
Satellite	Terra

2.2.2. Acquisition des données pluviométriques

Les données pluviométriques ont été obtenues à partir du produit satellitaire RFE 2.0. qui est disponible depuis janvier 2001. RFE 2.0. est produit à partir de données de micro-ondes passives (PM) provenant de deux satellites instruments SSM/I (*Special Sensor Microwave/Imager*) et AMSU (*Advanced microwave Sounding Unit*). Les données journalières issues de ce produit sont en coordonnées géographiques. Les totaux journaliers sont additionnés pour produire les totaux décadaires qui sont distribués avec les caractéristiques données en (Tableau 3).

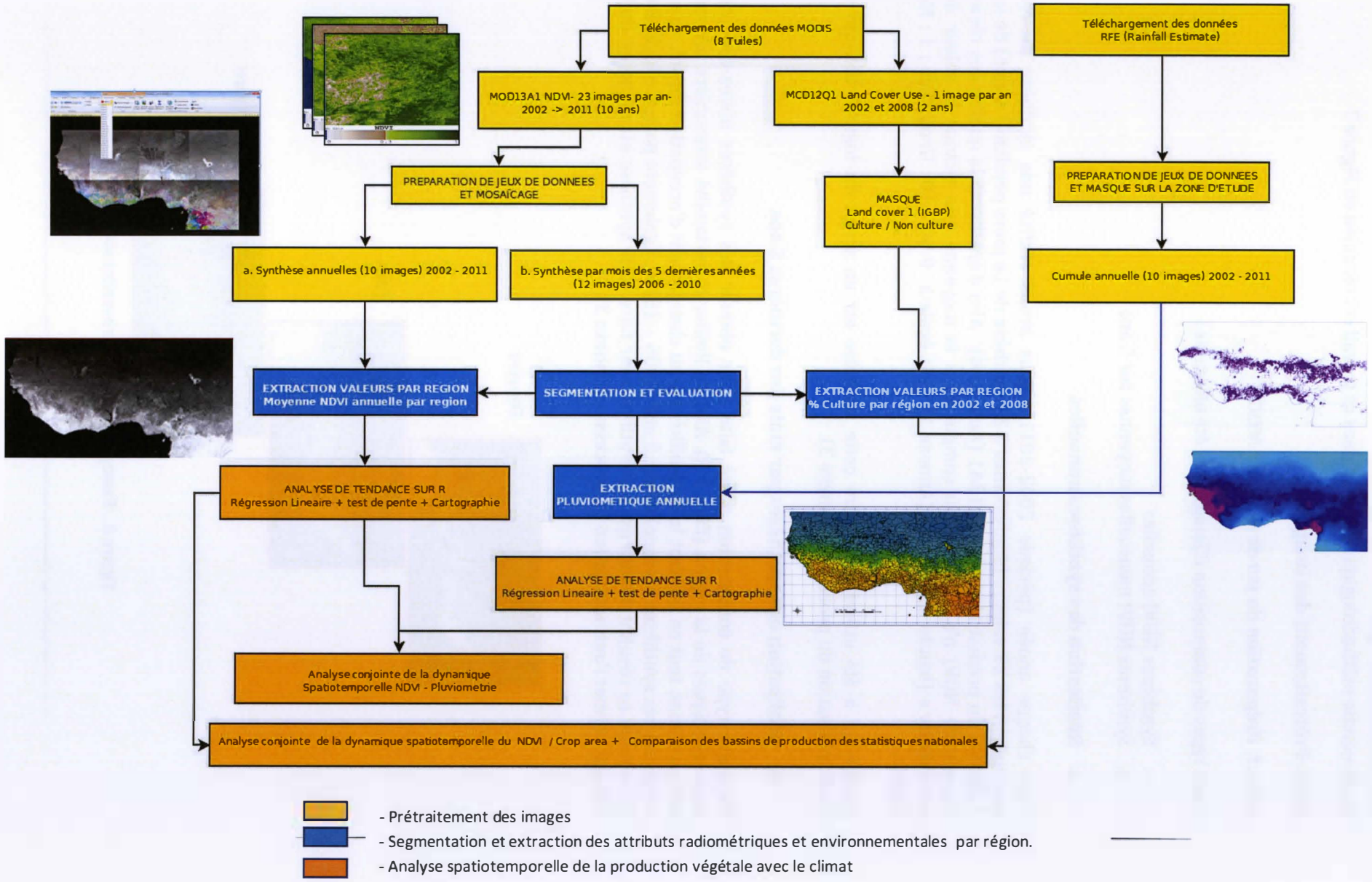
Tableau 3. Caractéristiques du produit RFE 2.0.

Caractéristique	Description
Projection	ALBERS Conical Equal-area qui utilise l'ellipsoïde Clarke 1866
Source	NOAA - CPC
Résolution temporelle	10 jours (décadaire)
Résolution spatiale	8 km * 8km
Format de données	Winzip image, byte (8 bit); Generic BIL, "Integer" (16 bit).
Tille de l'image	1152 lignes par 1152 colonnes
Centre lat, lon	1.000000, 20 .000000

Les images RFE peuvent couvrir des pays entiers avec une résolution spatiale de 8 km et il est possible d'obtenir des images à l'instant, sans coût pour les utilisateurs finaux (Beyene & Meissner 2010). Les images sont téléchargeables gratuitement sur l'internet depuis *National Oceanic and Atmospheric Organisation* (NOAA) avec l'assistance technique de *United States Geological Survey* (USGS) depuis le site http://earlywarning.usgs.gov/fews/

Nous avons obtenu les données pluviométriques sur la période janvier 2002 - décembre 2011 ; Au total, 360 images ont été téléchargées (3 images * 12 mois * 10 ans).

Figure 7. SCHEMA GENERAL DE LA METHODOLOGIE



2.3. Méthodologie

La démarche méthodologique adoptée dans ce travail est résumée en Figure 7

2.3.1. Prétraitement des images

2.3.1.1. Préparation du jeu de données MODIS

Deux types de composition d'images ont été effectués :

a. Synthèses NDVI annuelles
b. Synthèses NDVI mensuelles moyennes sur 5 ans

a. Réalisation des synthèses annuelles

Pour chaque année (période 2002-2011), nous avons réalisé une synthèse de NDVI en moyennant les 23 valeurs (équivalentes à 23 synthèse de 16 jours pendant l'année) de la bande 1 (NDVI) du produit MODIS MOD13A1 (Annexe 4). Afin d'améliorer la qualité des résultats, la donnée de NDVI n'a été prise en compte dans la moyenne que lorsque la valeur du pixel « reliability » (bande de qualité) (Annexe 1) était égale à 0 ou 1 (0 : Good Data ; 1 : Marginal Data).

L'outil qui a été utilisé pour faire cette synthèse est un script du logiciel IDL qui permet l'automatisation du processus (Annexe 3).

b. Réalisation des synthèses par mois des dernières 5 ans

Un autre type de composition a été faite pour obtenir des synthèses mensuelles de NDVI caractéristiques de la région (Figure 8). Afin de limiter la variabilité saisonnière interannuelle liée au climat, tout en limitant la variabilité liée au changement d'occupation du sol, nous avons moyenné ces synthèses mensuelles sur 5 ans (2006 – 2010). Egalement parmi le logiciel IDL il a été obtenu ce résultat. L'outil qui a été utilisé pour faire cette synthèse est un script du logiciel IDL qui permet l'automatisation du processus (Annexe 3).

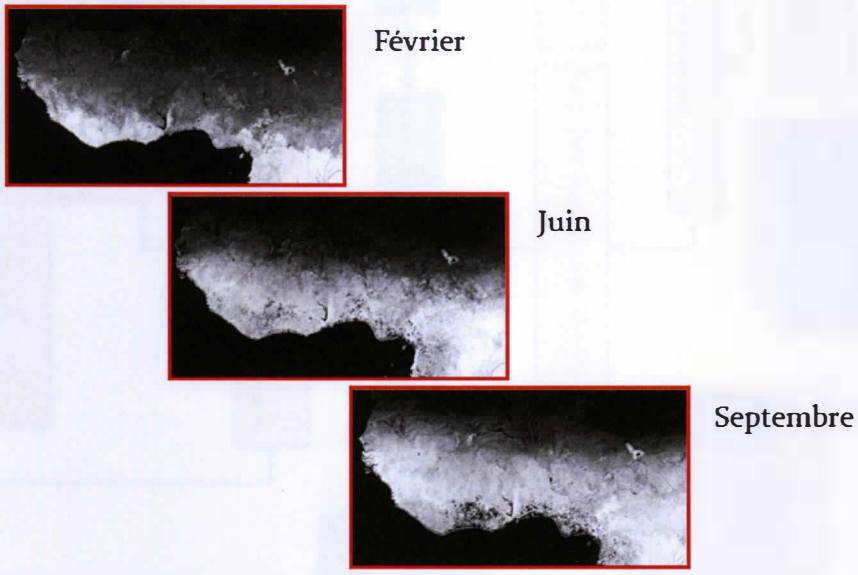


Figure 8. . Exemples d'images mensuelles mosaïquées

Le mosaïquage des images mensuelles a été fait afin de servir comme une première entrée pour la segmentation (Figure 9).

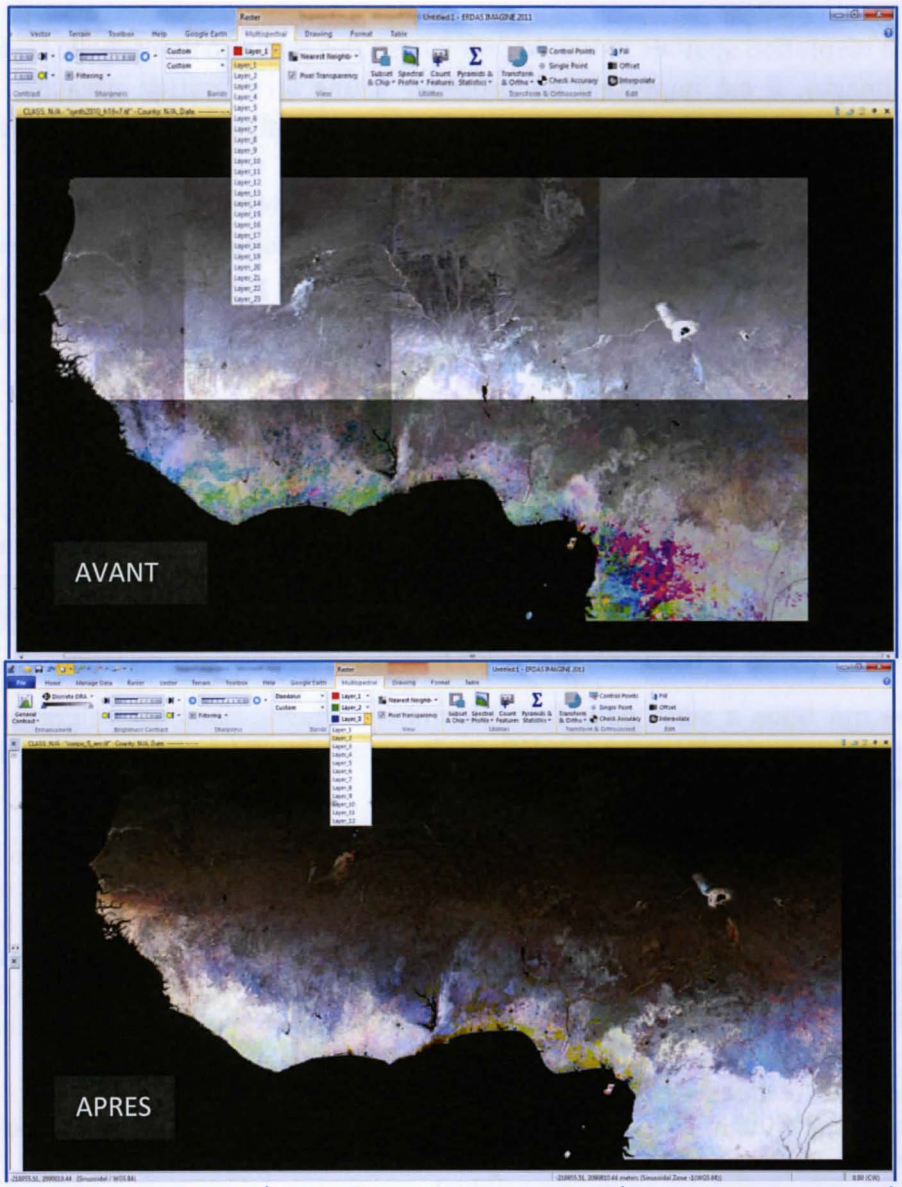


Figure 9. Comparaison avant et après mosaïquage des images synthèse par mois des 5 dernières années

2.3.1.2. Préparation du jeu de données RFE 2.0.

Pour chaque année (période 2002-2011), nous avons réalisé une image synthèse de pluviométrie en additionnant les 36 valeurs (équivalentes à 36 images décadaires pendant l'année) en utilisant l'outil model maker du logiciel ERDAS. Ensuite, nous avons fait une reprojection des images en coordonnées géographiques WGS 84.

2.3.2. Segmentation et extraction des attributs radiométriques et environnementaux (climat) par région

Les images à résolution spatiale modérée permettent des études à une échelle régionale. Afin de traiter ces images, il est important de procéder à une stratification préalable du territoire considéré, afin de diminuer la très forte variabilité spatiale qui existe à cette échelle.

L'approche orientée objet répond à ces besoins par l'obtention des régions (objets) qui permettent le zonage tout en conservant une information très riche. Contrairement à l'approche classique «pixel à pixel», la démarche orientée-objet ne traite pas le pixel de manière isolée, mais dans son contexte en regroupant des pixels au sein d'objets interprétés en se basant sur leurs valeurs spectrales, leur taille, leur forme, leur contexte (Benz et al. 2004).

a. Segmentation orientée objet sur e-cognition

La segmentation d'images est le processus qui réalise une partition d'image dans un ensemble de régions et ces régions sont ensuite considérées comme des individus munis d'attributs multiples (López-Ornelas E. et al. 2005). La segmentation des images dans cette étude a été faite avec le logiciel e-cognition où les unités de traitement de base de l'approche orientée objet sont des segments de l'image (ou objets), et pas des pixels isolés.

L'algorithme qui nous a servi pour les différentes segmentations est l'algorithme de multi-résolution où trois paramètres sont à définir : le paramètre d'échelle, le critère de forme et le critère de compacité.

Le plus pertinent pour la détection d'objets dans une image est la segmentation multiresolution. Il s'agit d'un algorithme de segmentation basée sur une technique ascendante de croissance par paire de régions qui débute par un objet constitué d'un seul pixel dans l'image. Les plus petits objets sont ensuite fusionnés progressivement autour de leur point de départ de manière itérative selon des critères d'homogénéité définis par l'utilisateur. Le processus s'arrête lorsque l'homogénéité des objets dépasse l'hétérogénéité maximale acceptée : le paramètre d'échelle.

- **Le jeu de données d'entrée**

L'image d'entré qui a été utilisée pour notre segmentation est une image composée de 12 bandes où chaque bande correspond à la moyenne par mois des dernières 5 années.

Au total 21 segmentations différentes (Tableau 4) ont été testées pour aboutir au zonage de l'Afrique de l'Ouest en « paysages homogènes ».

- **Paramètres de segmentation**

Dans l'algorithme « multiresolution segmentation » il faut fixer trois paramètres basiques : le paramètre d'échelle, le critère de forme et le critère de compacité (Figure 10).

✓ **Paramètre d'échelle (*scale parameter*)** : Ce paramètre sans dimension définit l'hétérogénéité maximale des objets produits par la segmentation. Dans une image hétérogène les objets résultants seront plus petits et dans une image plus homogène les objets résultants seront plus grands. Pour la même image la modification de ce paramètre modifie la taille des objets produits par la segmentation.

- ✓ **Critères d'homogénéité** : A partir des critères de forme et de compacité donnés pour l'utilisateur, eCognition calcule les critères d'homogénéité.

  a. *Shape (critère de forme)= la forme contre la couleur :* Il est possible de donner plus ou moins de poids à la forme ou à la couleur. La couleur fait référence à une homogénéité spectrale. C'est-à-dire une pondération du critère de forme égal à 0 implique que les objets seront évalués seulement par leur homogénéité spectrale.

  b. *Compactness (critère de compacité) :* Une pondération du critère de compacité à 0 implique que les objets auront un contour très découpé.

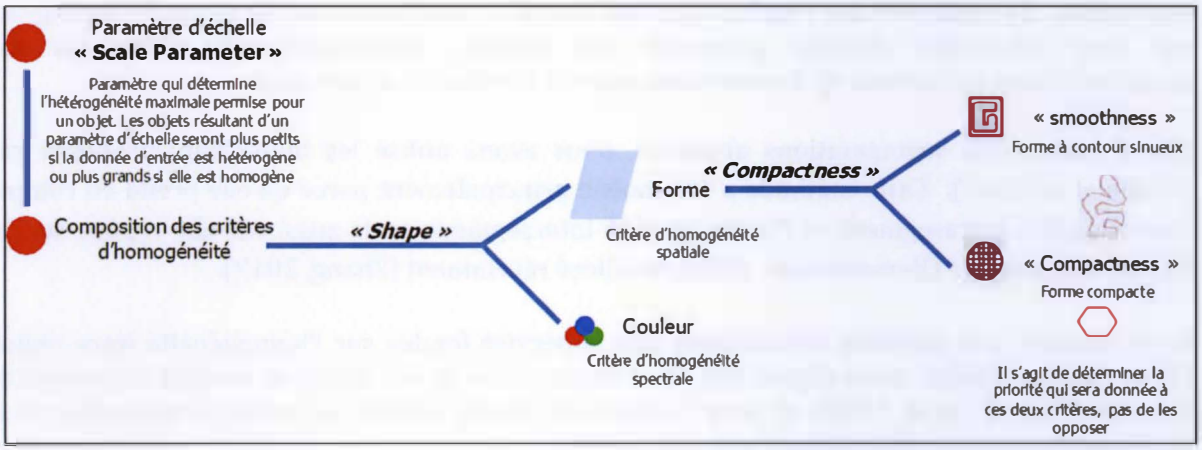


Figure 10. Les paramètres de la segmentation multi-résolution. (Formation continue UMR TETIS AgroParisTech. 2009)

Tableau 4. Paramétres de segmentations testés.

Paramètre d'échelle	Critère de forme	Critère de compacité
200	0.7	0.9
300	0.7	0.9
400	0.7	0.9
500	0.7	0.9
600	0.7	0.9
700	0.7	0.9
800	0.7	0.9
900	0.7	0.9
1000	0.7	0.9
200	0.1	0.5
200	0.3	0.5
200	0.5	0.5
200	0.9	0.5
500	0.1	0.5
500	0.3	0.5
500	0.5	0.5
500	0.9	0.5
800	0.1	0.5
800	0.3	0.5
800	0.5	0.5
800	0.9	0.5

- **Produit de sortie**

Le produit de sortie est un fichier .shp dans lequel chaque polygone représente une zone homogène par rapport.

- **Evaluation de la segmentation**

Plusieurs propositions pour l'évaluation non-supervisée d'une segmentation ont été faites par différentes auteurs ; cependant, il y a encore des recherches qui sont menées pour trouver la meilleure façon d'évaluer une segmentation. Haralick et Shapiro (1985) proposent quatre critères pour évaluer les résultats des segmentations: 1) les régions doivent être uniformes et homogènes, 2) l'intérieur des régions doit être simple et sans beaucoup de trous, 3) les régions qui sont adjacentes doivent présenter des valeurs significativement différentes des caractéristiques uniformes. 4) les bordures doivent être lissées et précises.

Afin d'évaluer les segmentations obtenues, nous avons utilisé les indicateurs proposés par (Zhang et al. 2012). Cette méthode a été choisie principalement parce qu'elle prend en compte l'homogénéité intrasegment et l'hétérogénéité intersegment, mais aussi car elle repose sur un formalisme robuste (Borsotti et al. 1998), amélioré récemment (Zhang, 2012).

Ils proposent une méthode d'évaluation non supervisé fondée sur l'homogénéité intra-région (T) et l'hétérogénéité inter-région (D). Pour la première ils ont utilisé et modifié l'équation de Borsotti (Borsotti et al. 1998), et pour la deuxième ils ont utilisé une variance normalisé de la moyenne des régions dans chaque une des régions.

$$T = \frac{1}{10S}\sqrt{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{e_i}{1+\log a_i}\right) \quad (2)$$

$$D = \left(\sum_{b=1}^{n}\sum_{i=1}^{n}(m_{ib} - mm_b)/n\right)\Big/\sqrt{n} \quad (3)$$

où S est la taille de l'image, e_i est l'erreur du vecteur, m_{ib} est la valeur moyenne de la bande b dans la région i, et mm_b est la valeur moyenne de toutes les régions dans la bande b.

L'indice de Zhang est égal à

$$Z = T + \lambda D \quad (4)$$

$$où\ \lambda = (T\max - T\min)/(D\max - D\min) \quad (5)$$

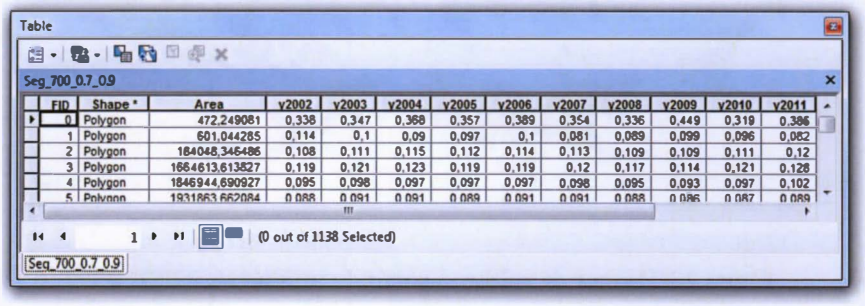
Cette méthode a été appliquée sur toutes les segmentations. La segmentation avec la valeur minimale de Z a été sélectionnée en étant considérée comme la meilleure segmentation.

2.3.3. Analyses spatio – temporelle de la production végétale avec le climat

2.3.3.1. Analyse de tendances de NDVI

En vue de faire l'analyse de tendances du NDVI sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest, il était d'abord nécessaire de préparer un fichier .shp avec la moyenne par an des pixels de chaque

région pendant les 10 ans (Figure 11). Pour cela nous avons pris les trois segmentations les mieux évaluées, et les avons croisées avec les images mosaïquées moyennes par année, en utilisant l'outil « zonal attributes » du logiciel ERDAS Imagine.



Table

Seg_700_0.7_0.9

FID	Shape *	Area	y2002	y2003	y2004	y2005	y2006	y2007	y2008	y2009	y2010	y2011
0	Polygon	472,249081	0,338	0,347	0,368	0,357	0,389	0,354	0,336	0,449	0,319	0,386
1	Polygon	601,044285	0,114	0,1	0,09	0,097	0,1	0,081	0,089	0,099	0,096	0,082
2	Polygon	184048,346486	0,108	0,111	0,115	0,112	0,114	0,113	0,109	0,109	0,111	0,12
3	Polygon	1664613,613827	0,119	0,121	0,123	0,119	0,119	0,12	0,117	0,114	0,121	0,128
4	Polygon	1846944,690927	0,095	0,098	0,097	0,097	0,097	0,098	0,095	0,093	0,097	0,102
5	Polygon	1931863,662084	0,088	0,091	0,091	0,089	0,091	0,091	0,088	0,086	0,087	0,089

(0 out of 1138 Selected)

Seg_700_0.7_0.9

Figure 11. Champs crées sur ERDAS pour l'analyses de tendance

Le fichier .dbf du *shapefile* en sortie de « Zonal attributes » a été ensuite converti en fichier .csv. Ce fichier est lu par un programme R qui calcule pour chaque segment les tendances de NDVI au cours des 10 ans. Ces tendances sont calculées par régression linéaire, et sont caractérisées individuellement par leur probabilité critique (p-value). Trois classes de tendance de NDVI (attribut « trend » en Figure 12)sont alors calculées :

- « 1 » Pente positive et p-value < 0.1 : augmentation significative du NDVI
- « -1 » Pente négative et p-value < 0.1 : diminution significative du NDVI
- « 0 » p-value > 0.1 : pas d'évolution significative du NDVI.

Un nouveau fichier .dbf de sortie est ainsi obtenu. Il peut alors être visualisé avec le logiciel Arc GIS.

FID	Shape *	Area	y2002	y2003	y2004	y2005	y2006	y2007	y2008	y2009	y2010	y2011	slope	p-value	trend
0	Polygon	472,249081	0,338	0,347	0,368	0,357	0,389	0,354	0,336	0,449	0,319	0,385	0,003236363636	0,457903924023	0
1	Polygon	601,044285	0,114	0,1	0,09	0,097	0,1	0,081	0,089	0,099	0,096	0,082	-0,00190303030	0,072438072177	-1
2	Polygon	184048,346	0,108	0,111	0,115	0,112	0,114	0,113	0,109	0,109	0,111	0,12	0,000412121212	0,319690657354	0
3	Polygon	1664613,61	0,119	0,121	0,123	0,119	0,119	0,12	0,117	0,114	0,121	0,128	0,000187878787	0,671139798240	0
4	Polygon	1846944,69	0,095	0,098	0,097	0,097	0,097	0,098	0,095	0,093	0,097	0,102	0,000187878787	0,505690306711	0
5	Polygon	1931863,66	0,088	0,091	0,091	0,089	0,091	0,091	0,088	0,086	0,087	0,089	-0,00028484848	0,175228029561	0
6	Polygon	4697246,95	0,102	0,104	0,105	0,105	0,104	0,104	0,101	0,1	0,101	0,103	-0,00029696969	0,139500968830	0

Figure 12. Base de données du fichier dbf. de sortie créé par le logiciel « R » pour l'analyse des tendances.

2.3.3.2. Analyse de tendances de pluviométrie

L'analyse des tendances pluviométrique est faite avec la même méthode que l'analyse des tendances de NDVI. Cependant, seule la meilleure segmentation a été utilisée pour le calcul des tendances.

2.3.3.3. Masque et zone des cultures

Pour connaître les zones « culture » et « non culture » et leurs pourcentages dans chaque région segmentée, nous avons fait un masque de culture à partir de la bande 1 (land cover type 1 IGBP global vegetation classification scheme) du produit MCD12Q1.
Les pixels ayant pour valeur 12 *« croplands »* ou 14 *« Cropland/Natural végétation mosaic »* ont été classé avec la valeur 1 qui représente les zones de « culture » et le reste des pixels a reçu la valeur 2 qui représente le « non culture ».

Ce processus a été fait pour l'année 2002 et pour l'année 2008 (Figure 13 et Figure 14)

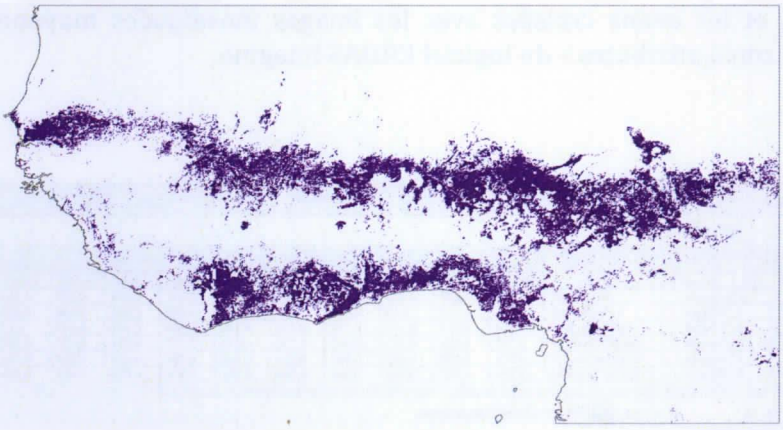


Figure 13. Masque de culture à partir du produit MCD12Q1 2002

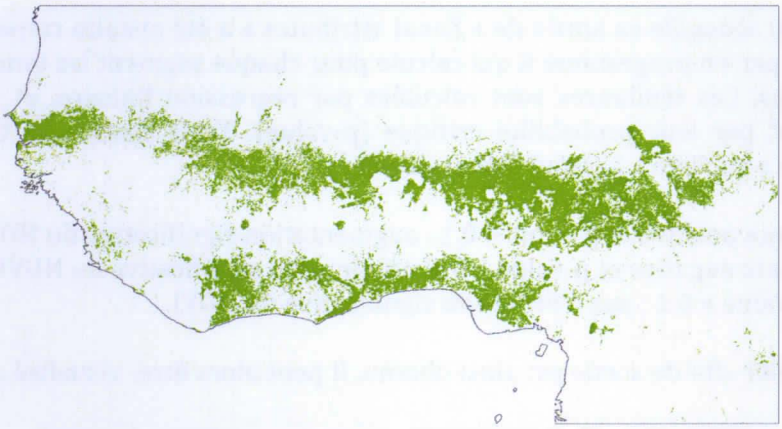


Figure 14. Masque de culture à partir du produit MCD12Q1 2008

Nous avons ensuite croisé les deux masques de cultures avec les « *shapefile* » des segmentations précédemment obtenues. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel ERDAS, l'outil « *Zona atributtes* » et la fonction "*majority*" et "*majority fraction*".

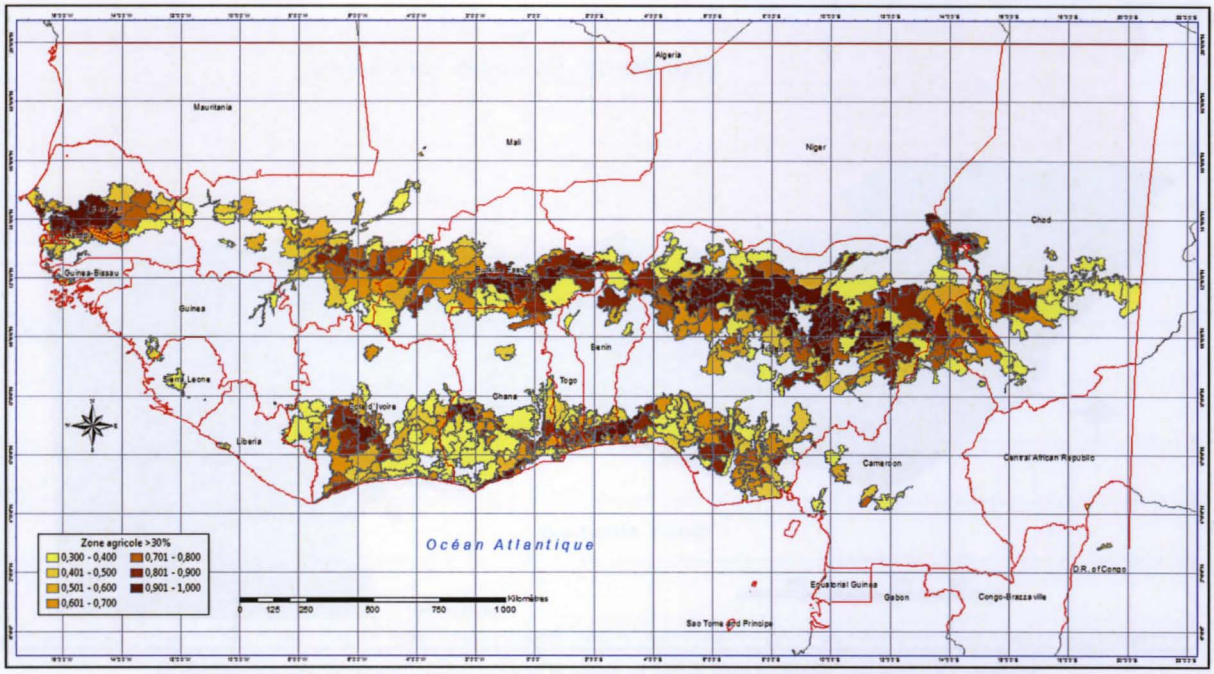


Figure 15. Masque de Carte du domaine cultivée avec les segments considérés comme zone agricole > 30% en 2002 ou 2008

2.3.3.4. Analyse conjointe de la dynamique spatiotemporelle NDVI – Pluviométrie sur l'ENSEMBLE DE LA ZONE

Pour commencer à faire cette analyse, la zone d'étude a été divisée en deux parties : une partie nord qui correspondant à la zone soudano-sahélienne et une partie sud qui correspond à la zone soudano-guinéenne, (Figure 16) qui se différencient par la nature des facteurs limitants de la production (Bégué et al, 2011). Les limites des deux zones ont été définies en prenant en compte les limites climatiques préconisées par la FAO et aussi en fonction des limites remarquables de NDVI du mois d'août où le NDVI est à son plus haut niveau dans la région. De cette façon les intervalles de pluviométrie obtenus dans la zone nord sont entre 0 – 800mm et dans la zone nord entre 500 et 3000mm approximativement.

Ensuite, dans le but d'établir une corrélation entre les tendances de NDVI et celles de la pluviométrie, une régression linéaire a été faite sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest, en prenant NDVI comme variable dépendante (y) et la pluviométrie comme variable indépendante (x).

Les données avec une p-value inférieure à 0.10 ont été choisies pour l'analyse de corrélation en assurant un intervalle de confiance de 90%.

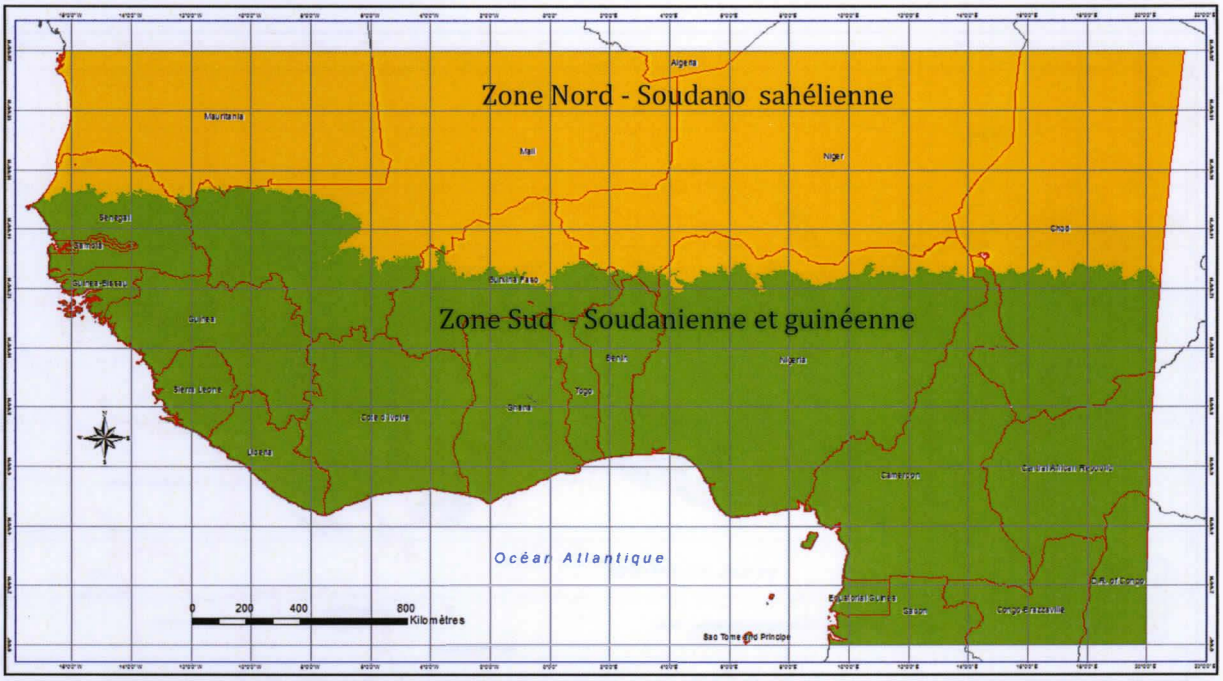


Figure 16. Zonage nord et sud dans la zone d'étude pour l'analyse de corrélation

2.3.3.5. Analyse conjointe de la dynamique spatiotemporelle NDVI – Pluviométrie SUR LA ZONE AGRICOLE SEULEMENT

Enfin, une analyse de corrélation entre le NDVI et la pluviométrie a été faite seulement dans les zones agricoles. Comme pour l'analyse sur l'ensemble du territoire, les résultats obtenus de l'analyse de tendances dans les zones cultivées a été comparé avec des statistiques nationales.

Un masque avec présence de cultures supérieur à 30% par segment a été utilisé pour séparer le NDVI et la pluviométrie seulement dans la zone agricole (Figure 15).

2.3.3.6. Comparaison avec les statistiques nationales

Pour comparer les tendances de la production agricole on a pris la tendance du NDVI pour représenter les rendements, et l'évolution de la classe « agriculture » pour représenter les surfaces cultivées, afin de pouvoir comparer les deux composantes de la production agricole.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Evaluations des segmentations

Pour évaluer les segmentations qui ont été faites (Tableau 4) nous avons choisi la méthode non supervisée proposée par Zhang et al. (2012). Rappelons que cette méthode prend en compte l'homogénéité intrasegment et l'hétérogénéité intersegment.

Dans un premier temps, nous avons testé l'effet du paramètre d'échelle (entre 200 et 1000, par pas de 100), en fixant 0.7 et 0.9 comme de critère de forme et critère de compacité respectivement (Tableau 5 et Figure 17).

Tableau 5. Résultats de test de validation en utilisant l'indice de Zhang et al. 2012

No.	Paramètre d'échelle	T	T Norm	D	D Norm	Indice de Zhang.
1	200	189	1.0000	112	0.0000	300
2	300	83	0.4061	146	0.1892	228
3	400	48	0.2108	180	0.3823	227
4	500	32	0.1226	200	0.4904	231
5	600	23	0.0730	232	0.6685	254
6	700	18	0.0452	255	0.8001	272
7	800	14	0.0215	256	0.8063	269
8	900	11	0.0089	265	0.8524	275
9	1000	10	0.0000	291	1.0000	300
MAX		189		291	⍰ - TD	0.9968
MIN		10		112		

Les meilleures segmentations sont celles qui présentent les valeurs minimales de l'index de Zhang, soit les paramètres d'échelle compris entre 300 et 500 (4) (Figure 17). Ces segmentations présentent des valeurs optimales d'homogénéité intrasegments et d'hétérogénéité intersegment.

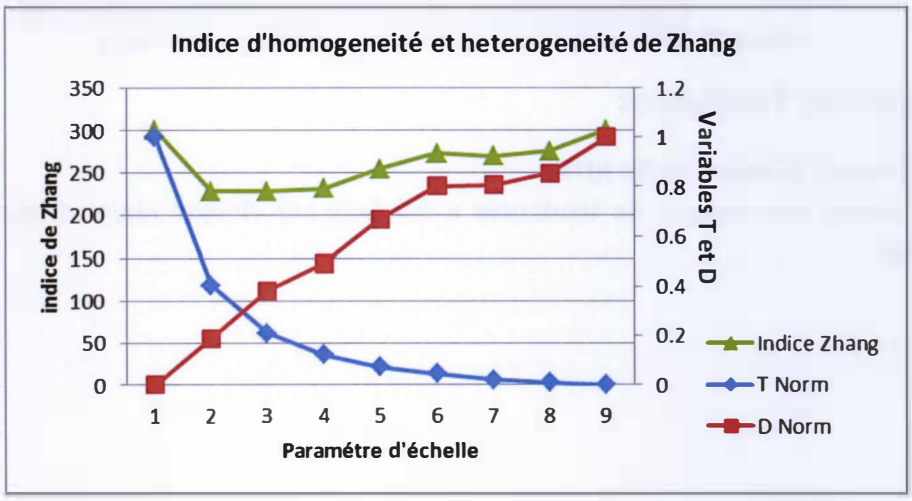


Figure 17. Indices d'évaluation des différentes segmentations testées.

En observant la graphique nous pouvons remarquer que plus l'échelle est grande, plus l'homogénéité intra-région (T) diminue et l'hétérogénéité inter-région (D) augmente. Ces résultats sont donc cohérents.

La comparaison visuelle des segmentations s'est faite par superposition sur l'image NDVI du mois d'août car c'est la saison de pluie et le NDVI se trouve dans son niveau maximal dans la plus part de l'Afrique de l'Ouest (Figure 18).

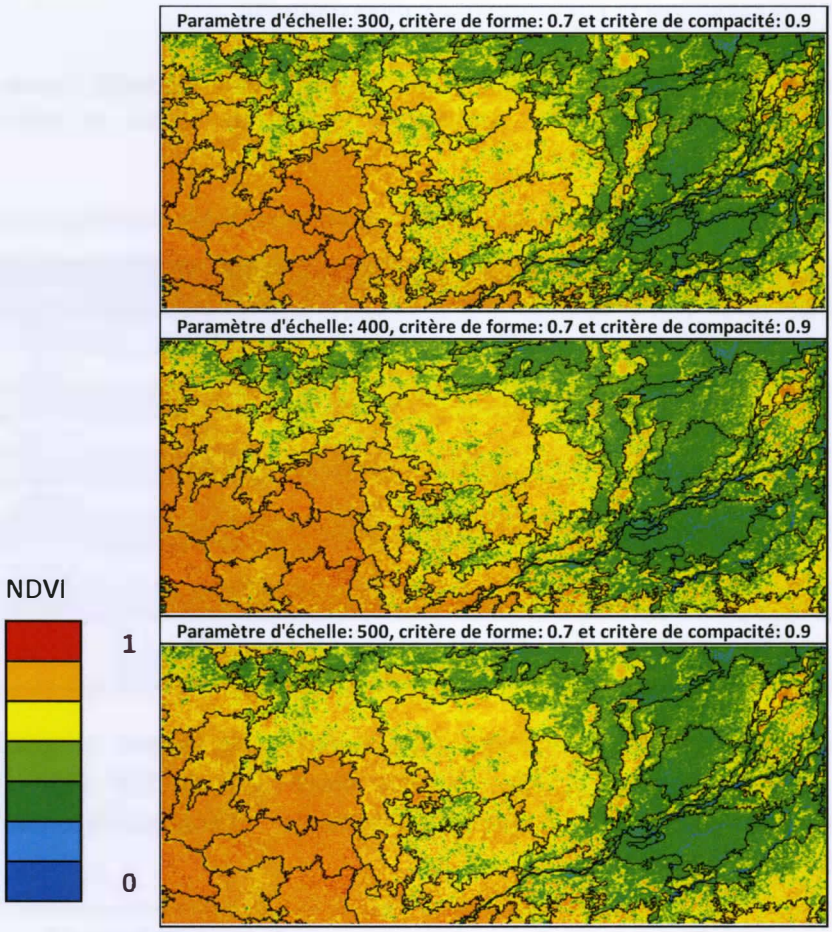


Figure 18. Trois meilleures segmentations selon le test de Zhang.

3.2 Analyses de Tendances

3.2.1. Analyses de Tendances de NDVI

Dans cette partie, une analyse de tendances a été faite sur chaque région (Figure 19) de la segmentation.

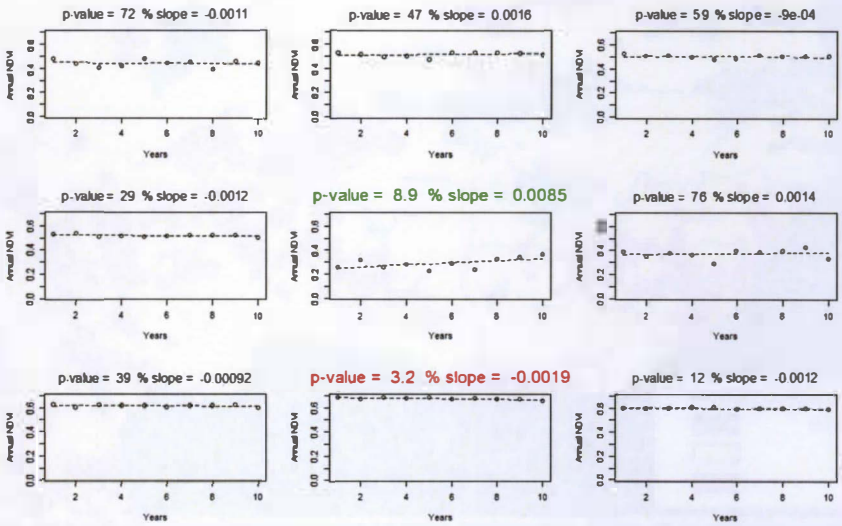


Figure 19. Exemples de tendances de NDVI calculées avec R à l'échelle du segment, entre 2002 et 2011. Les titres en noir correspondent à une évolution non significative au seuil de 10%, alors que, ceux en vert et rouge correspondent à une augmentation et une diminution du NDVI respectivement.

A partir de l'analyse des tendances faites avec R, nous avons obtenu un nouveau fichier .dbf qu'il est alors possible de visualiser. Ainsi, à partir des 3 segmentations présélectionnées précédemment, nous obtenons trois cartes de tendance (Figure 20, Figure 21 et Figure 22).

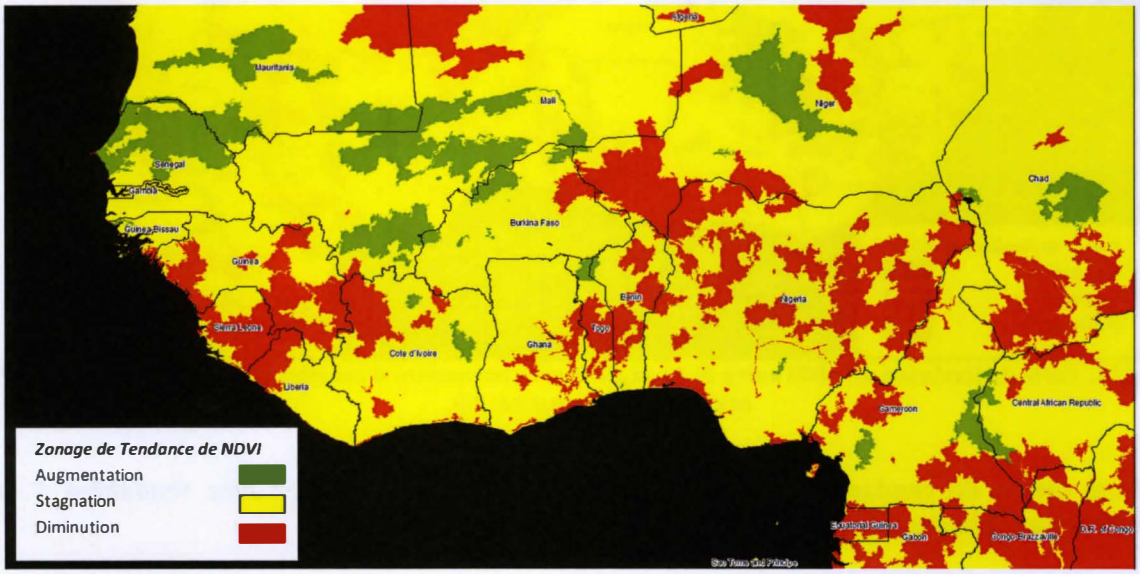


Figure 20. Carte de tendance de NDVI entre 2002 et 2011 avec paramètre d'échelle: 500, critère de forme: 0.7 et critère de compacité: 0.9.

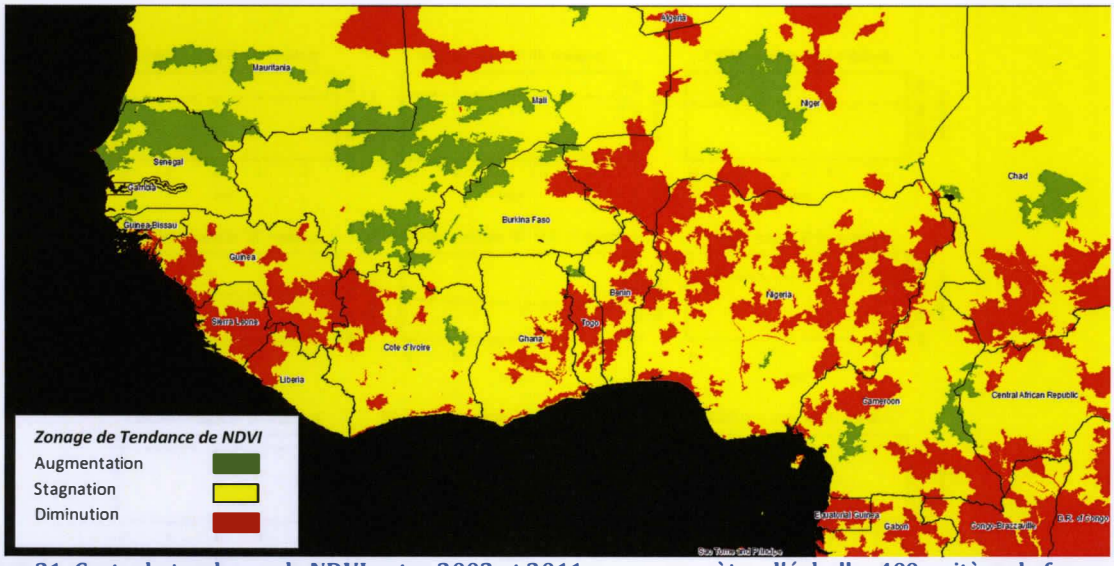


Figure 21. Carte de tendance de NDVI entre 2002 et 2011 avec paramètre d'échelle: 400, critère de forme: 0.7 et critère de compacité: 0.9.

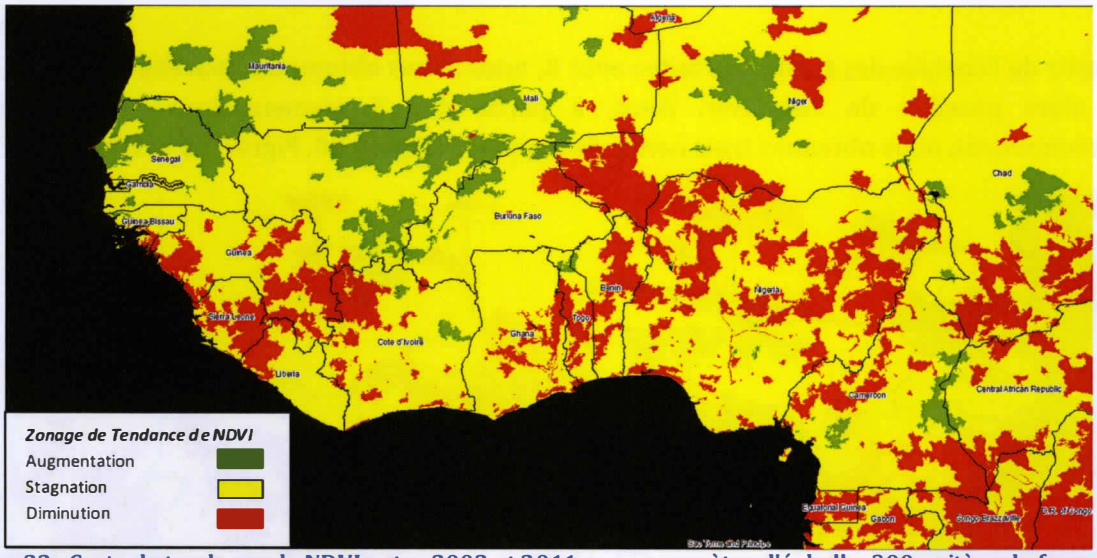


Figure 22. Carte de tendance de NDVI entre 2002 et 2011 avec paramètre d'échelle: 300, critère de forme: 0.7 et critère de compacité: 0.9.

Les trois cartes de tendance montrent peu de différence. Les zones avec tendances à la stagnation sont très étendues.

En regardant les zones avec tendance à l'augmentation ou à la diminution il y a de taches avec très peu de différences et leur localisation coïncide bien.

Par ailleurs, selon l'état de maturation de la végétation en particulier dans les zones de culture ou des forêts la signature spectrale peut varier en influençant la réponse du NDVI. De même le sol nu peut être facilement confondu avec les zones de préparation des cultures. La présence de tendances temporelles opposées dans une zone d'étude dépend de la nature de chaque couverture, avec des zones de végétation expérimentent une augmentation de l'activité de la végétation et des zones dégradées qui souffrent d'une diminution de la couverture végétale.(Alatorre et al. 2010)

Tableau 6. Comparaison de tendances de NDVI par segmentation

Comparaison de tendances de NDVI par segmentation				
Segmentation	**Tendance**	**Surface (Ha)**	**%**	**Q segments**
300	Diminution	135919038.44	19.47	1155.00
	Stagnation	507590420.83	72.70	3671.00
	Augmentation	54734183.70	7.84	393.00
Total		***698243642.96***	***100.00***	***5219.00***
400	Diminution	138835498.50	19.88	687.00
	Stagnation	507686158.59	72.71	2129.00
	Augmentation	51721985.86	7.41	235.00
Total		***698243642.96***	***100.00***	***3051.00***
500	Diminution	143391178.06	20.54	468.00
	Stagnation	499643499.15	71.56	1443.00
	Augmentation	55208965.75	7.91	160.00
Total		***698243642.96***	***100.00***	***2071.00***
Moyenne	***Diminution***		***19.96***	
	Stagnation		***72.32***	
	Augmentation		***7.72***	

Au niveau des pays (Tableau 7) nous trouvons que les pays qui présentent les plus grandes tendances à la diminution de NDVI sont la Guinée Equatoriale, la République démocratique du Congo et le Congo-Bazzaville, avec respectivement 83.7%, 66.7% et 61.4% de leur surface totale. Les pays avec les plus fortes tendances à l'augmentation sont le Sénégal, la Mauritanie, le Burkina Faso et le Mali avec respectivement 44.1%, 20.1%, 17.9% et 8.18% de leur surface totale.

Tableau 7. Tendance du NDVI par rapport à la surface (ha) par pays dans la zone d'étude

	Tendance du NDVI par rapport à la surface (ha) par pays dans la zone d'étude						
Pays	*Diminution*	*%*	*Stagnation*	*%2*	*Augmentation*	*%3*	*Total général*
Algerie	*620 224*	22.9	*2 085 105*	77.1	*0*	0.0	*2 705 329*
Bénin	*4 333 042*	37.4	*7 039 310*	60.7	*228 188*	2.0	*11 600 541*
Burkina Faso	*1 597 233*	5.8	*23 596 744*	86.0	*2 245 919*	8.2	*27 439 896*
Cameroun	*10 243 191*	21.9	*34 227 114*	73.1	*2 354 769*	5.0	*46 825 075*
Central African Republic	*5 515 773*	19.4	*21 656 828*	76.4	*1 186 213*	4.2	*28 358 814*
Chad	*12 285 968*	14.9	*66 667 038*	80.7	*3 672 725*	4.4	*82 625 731*
Congo-Brazzaville	*8 674 045*	61.4	*5 450 599*	38.6	*0*	0.0	*14 124 644*
Cote d`Ivoire	*5 865 762*	18.0	*25 698 588*	79.0	*948 190*	2.9	*32 512 540*
D.R. of Congo	*7 078 377*	66.7	*3 534 421*	33.3	*6 178*	0.1	*10 618 976*
Equatorial Guinea	*2 265 074*	83.6	*442 854*	16.4	*0*	0.0	*2 707 929*
Gabon	*4 495 116*	48.8	*4 715 238*	51.2	*0*	0.0	*9 210 353*
Gambie	*0*	0.0	*1 043 525*	98.8	*12 333*	1.2	*1 055 858*
Ghana	*2 817 752*	11.8	*21 126 136*	88.2	*77*	0.0	*23 943 964*
Guinée	*10 147 215*	41.2	*14 469 673*	58.8	*2 797*	0.0	*24 619 685*
Guinée-Bissau	*172 571*	5.1	*3 085 847*	91.5	*112 837*	3.3	*3 371 255*
Libéria	*2 513 452*	26.1	*7 115 393*	73.9	*0*	0.0	*9 628 845*
Mali	*7 160 962*	7.5	*71 228 119*	74.6	*17 096 552*	17.9	*95 485 633*
Mauritanie	*3 898 596*	7.3	*38 731 441*	72.6	*10 732 087*	20.1	*53 362 124*
Niger	*16 351 186*	17.3	*70 823 332*	74.9	*7 405 626*	7.8	*94 580 144*
Nigeria	*30 409 945*	33.3	*60 766 380*	66.6	*110 828*	0.1	*91 287 153*
Sao Tome et Prince	*0*	0.0	*100 484*	100.0	*0*	0.0	*100 484*
Sénégal	*27 544*	0.1	*11 001 113*	55.8	*8 696 875*	44.1	*19 725 533*
Sierra Leone	*4 517 928*	62.2	*2 740 495*	37.8	*851*	0.0	*7 259 274*
Togo	*2 392 801*	41.8	*2 925 041*	51.1	*409 673*	7.2	*5 727 515*
Total général	***143 383 759***	***20.5***	***500 270 817***	***71.6***	***55 222 720***	***7.9***	***698 877 296***
Moyenne Total	***27.0***		***67.5***		***5.5***		***100***

Si on prend en compte le postula fait par (Fensholt et al. 2006) qui mentionne que pour des biomes relativement homogènes tels que le semi-aride de la zone soudano-sahelienne une relation quasi-linéaire existe entre la productivité primaire et la somme annuelle de NDVI (ΣNDVI), on se permet de faire une comparaison entre le NDVI et la productivité, ainsi, selon (AFD, CIRAD, FIDA 2011) depuis dix ans il y a une certain stagnation aussi bien des surfaces que des rendements en Guinée Bissau, au Libéria, au Ghana et en Gambie. En comparant avec nos résultats on trouve des coïncidences pour trois des pays ce qui nous amène à penser que la tendance continue.

De même, par rapport aux pays avec une tendance à l'augmentation on voit que le Sénégal, la Mauritanie, le Niger et le Togo sont ceux qui représentent les taux plus hauts.

Ces variations de NDVI peuvent être liées soit aux phénomènes naturels ou aux phénomènes anthropiques, mais dans quelle mesure? pour essayer de répondre à cette question on a étudié les tendances de la pluviométrie et de l'usage du sol (notamment les zones de cultures) en Afrique de l'Ouest pendant la même décennie.

3.2.2. Analyses de tendance de la pluviométrie

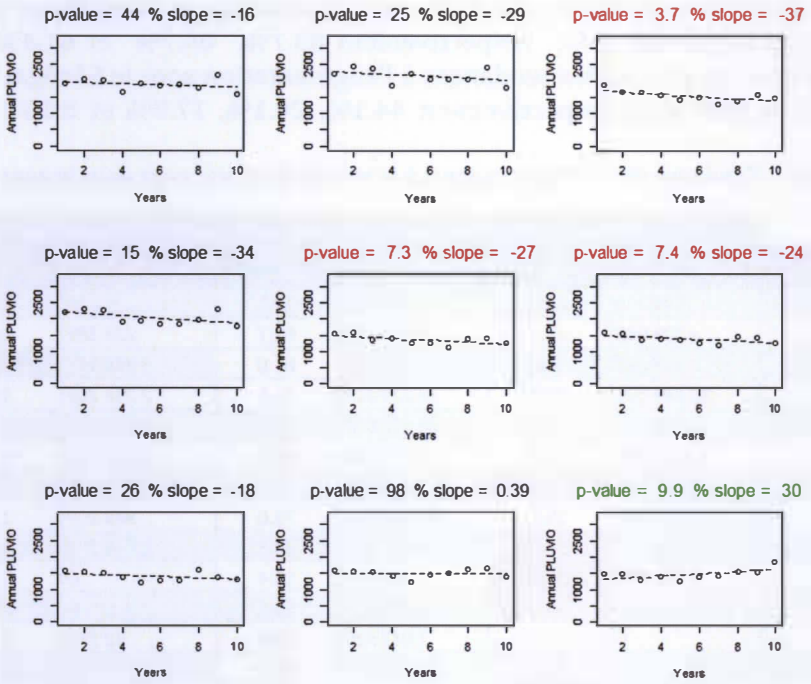


Figure 23. Exemples de tendances de pluviométrie calculées avec R à l'échelle du segment, entre 2002 et 2011. Les titres en noir correspondent à une évolution non significative au seuil de 10%, alors que, les ceux en vert et rouge correspondent à une augmentation et une diminution du NDVI respectivement.

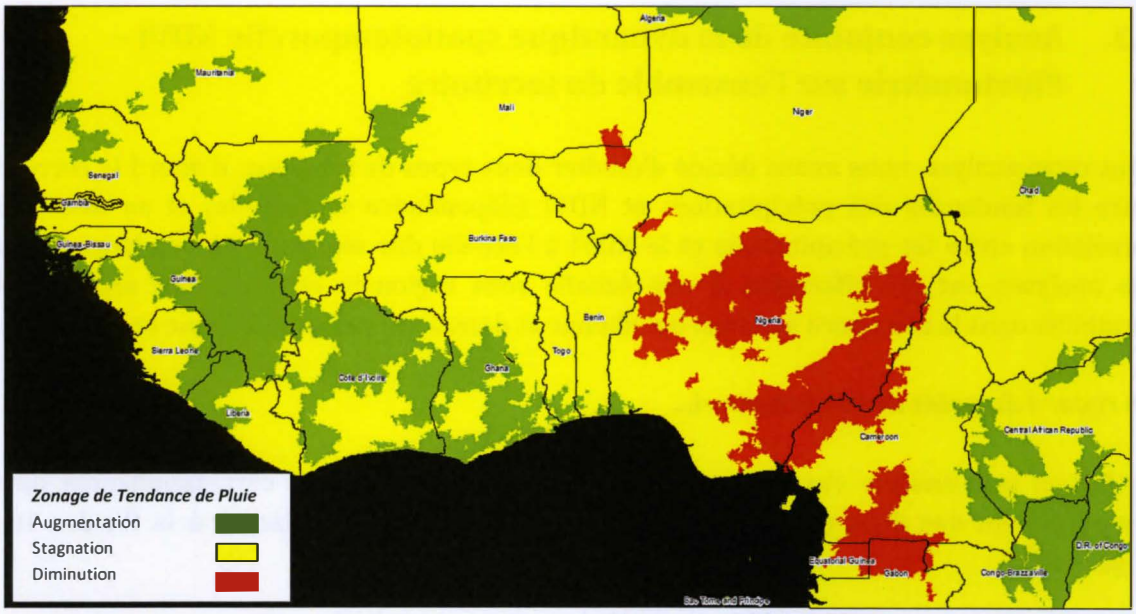


Figure 24. Carte de tendance de Pluie entre 2002 et 2011

Ici, nous voyons que les différentes classes de tendance pluviométrique sont plus localisées que dans le NDVI. Dans la zone sahélienne et soudanienne la quantité de pluie annuelle varie peu, alors que vers l'ouest guinéen (Guinée, Sud de Mali, Sierra Leone, Liberia, Côte d'Ivoire, Ghana) la tendance est à l'augmentation (Figure 24 et

Tableau 8).

Tableau 8. Tendance de la pluviométrie par rapport à la surface (ha) par pays dans la zone d'étude

	Tendance de la pluvimetrie par rapport à la surface (ha) par pays dans la zone d'étude						
Pays	Diminution	%	Stagnation	%2	Augmentation	%3	Total général
Algerie	0	0.0	2069646	76.5	635683	23.5	2 705 329
Bénin	0	0.0	11281425	97.2	319116	2.8	11 600 541
Burkina Faso	0	0.0	26806386	97.7	633510	2.3	27 439 896
Cameroun	9 870 372	21.1	35183785	75.1	1770918	3.8	46 825 075
République Centrafricaine	0	0.0	19536483	68.9	8822330	31.1	28 358 814
Chad	0	0.0	80290598	97.2	2335134	2.8	82 625 731
Congo-Brazzaville	241 879	1.7	6499157	46.0	7383608	52.3	14 124 644
Cote d`Ivoire	0	0.0	14334243	44.1	18178297	55.9	32 512 540
D.R. of Congo	0	0.0	5706103	53.7	4912873	46.3	10 618 976
Equatorial Guinea	1 138 562	42.0	1569366	58.0	0	0.0	2 707 929
Gabon	2 859 718	31.0	6350635	69.0	0	0.0	9 210 353
Gambie	0	0.0	1055858	100.0	0	0.0	1 055 858
Ghana	0	0.0	14144939	59.1	9799025	40.9	23 943 964
Guinée	0	0.0	7353679	29.9	17266006	70.1	24 619 685
Guinée-Bissau	0	0.0	2720324	80.7	650931	19.3	3 371 255
Libéria	0	0.0	5698264	59.2	3930581	40.8	9 628 845
Mali	427 155	0.4	78700981	82.4	16357497	17.1	95 485 633
Mauritanie	0	0.0	50038919	93.8	3323205	6.2	53 362 124
Niger	685 868	0.7	90162174	95.3	3732101	3.9	94 580 144
Nigeria	34 014 103	37.3	56685286	62.1	587764	0.6	91 287 153
Sao Tome et Prince	0	0.0	38285	38.1	62199	61.9	100 484
Sénégal	0	0.0	18000075	91.3	1725458	8.7	19 725 533
Sierra Leone	0	0.0	5275516	72.7	1983758	27.3	7 259 274
Togo	0	0.0	5052356	88.2	675159	11.8	5 727 515
Total général	**49 237 658**	**7.0**	**544554483**	**77.9**	**105085154**	**15.0**	**698 877 296**

3.3. Analyse conjointe de la dynamique spatiotemporelle NDVI – Pluviométrie sur l'ensemble du territoire

Dans cette analyse, nous avons décidé d'étudier deux types de relations: d'abord la corrélation entre les tendances des précipitations et NDVI (dépendance temporelle) et en deuxième la corrélation entre les précipitations et le NDVI à l'échelle des segments (dépendance spatiale). Ces analyses ont été effectuées à une échelle sous régionale en regardant séparément la variabilité dans la zone nord soudano-sahélienne et dans zone sud soudanienne et guinéenne.

Un regard du point de vue temporel...

En faisant une analyse visuelle on trouve certaines similitudes et correspondances dans le comportement des deux courbes un peu plus remarquables au début et à la fin des 10 ans (Figure 25).

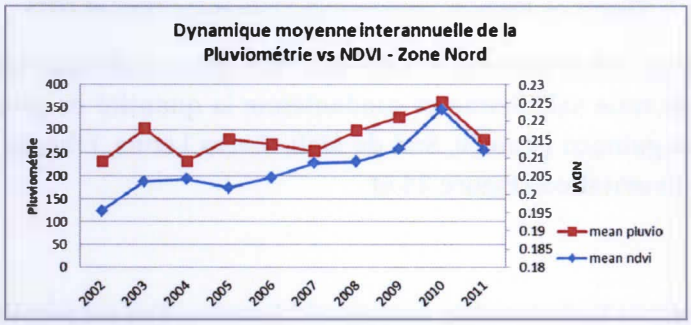


Figure 25. Dynamique moyenne interannuelle de la pluviométrie et du NDVI – Zone Nord

Selon les résultats obtenus, nous trouvons que la corrélation dans la zone nord est plus grande que celle dans la zone sud. Cependant la tendance pluviométrie dans la zone nord n'explique que 37% de la tendance du NDVI sur la période considérée (Figure 26).

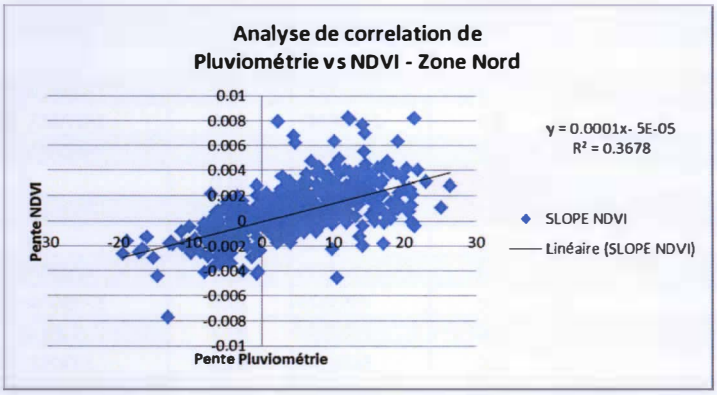


Figure 26. . Corrélation entre les tendances de la pluviométrie et celle du NDVI par région dans la zone Nord.

Par ailleurs dans la zone sud, on n'observe pas cette relation entre variation de la pluviométrie et variation du NDVI (R^2 = 0.01) (Figure 27 et Figure 28).

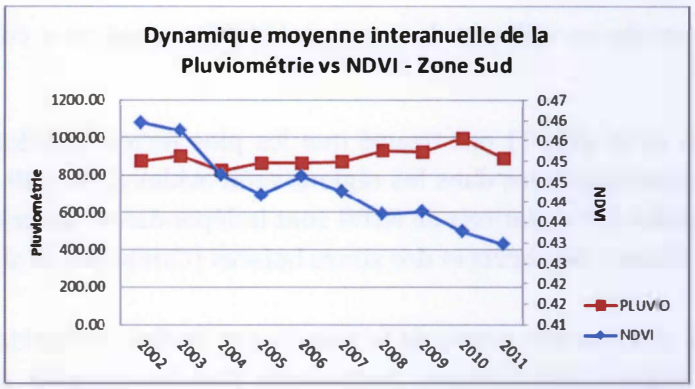


Figure 27. Dynamique moyenne interannuelle de la pluviométrie vs NDVI – Zone Sud

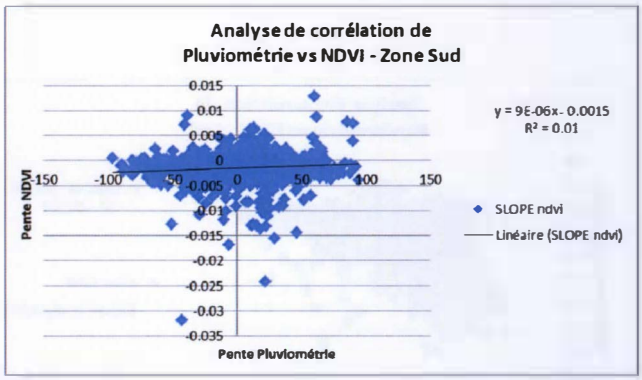


Figure 28. Analyse de corrélation des tendances de pluviométrie vs les tendances de NDVI par région dans la zone Sud.

Un regard du point de vue spatial...

En regardant la corrélation entre pluviométrie annuelle et NDVI annuel (Figure 29), on constate que cette relation est plus importante dans la zone nord avec un $R^2 = 0.52$, contre $R^2 = 0.24$ dans la zone Sud.

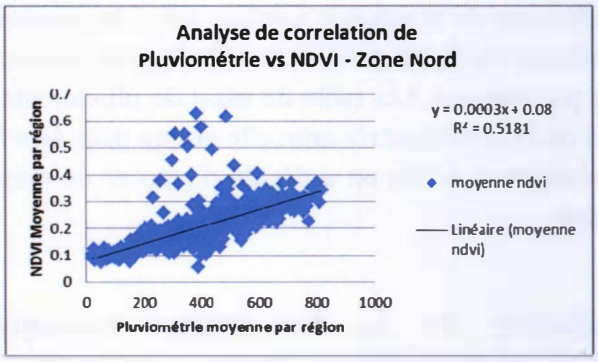


Figure 29. Analyse de corrélation de pluviométrie vs NDVI moyenne par région dans la zone Nord

En comparant nos résultats avec des autres auteurs on trouve des similitudes. Par exemple Farrar et al. 1994 ont regardé la relation entre la précipitation et l'NDVI dans les zone semi-aride de Botswana et Afrique de l'Est, en trouvant une relation linéaire entre les précipitations et NDVI à condition que les précipitations ne dépassent pas environ 500mm par année ou 50 - 100mm par mois ; pour sa part Li et al. 2004 ont conclu que ces limites peuvent arriver jusqu'à

700 – 800 mm par année en utilisant des images AVHRR, ce qui on a constaté aussi avec nos images MODIS.

D'ailleurs Camberlin et al. (2007) ont trouvé que les plus fortes corrélations, pour la plupart supérieures à 0.60, sont observées dans les régions semi-arides (200-600 mm de précipitations annuelles). En revanche, les variations de NDVI sont indépendantes de celles de la pluviométrie notamment dans la plupart des forêts et des zones boisées (Camberlin et al. 2007).

Dans certains zones, tels que une partie de la Mauritanie, le Mali, le Burkina Faso, le Tchad et le Soudan, il y a des régions caractérisées notamment par valeurs plus élevées de r (0,7-0,8) indiquant une forte relation entre les précipitations annuelles et ΣNDVI(Fensholt & K. Rasmussen 2011)

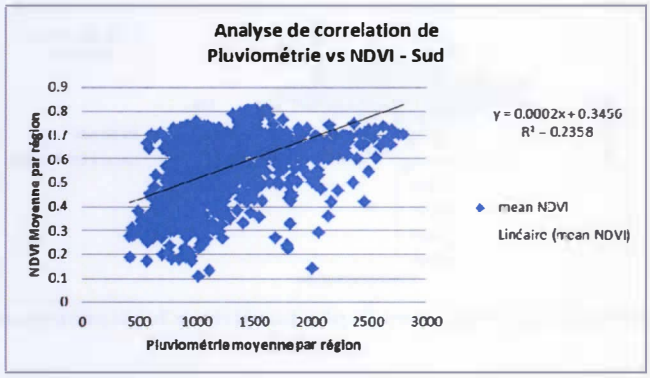


Figure 30. Analyse de corrélation de pluviométrie vs NDVI moyenne par région dans la Zone Sud

Dans le sud, nous trouvons une légère augmentation de la corrélation en comparant directement les deux variables et sans tenir compte de l'effet de la temporalité.

Par rapport aux limites de l'approche orienté objets et comparant avec les résultats obtenus dans la zone sud, où on n'a pas trouvé de corrélation (Figure 30); une basse corrélation peut être expliquée par la différence de résolution spatiale entre les données NDVI de MODIS (500 m) et celles de la pluviométrie R.F.E. 2.0. (8 km). De même, quelques cas il a existé une limitation de la taille de segments par rapport à la taille de pixel de pluviométrie (8km), ce que fait une contrainte pour le calcul de la pluviométrie annuelle et que peut être l'origine de biais dans les données de base, mais dans tous le cas on a décidé d'ignorer de données avec d'informations manquantes ou aberrantes.

3.4. Analyse conjointe de la dynamique spatiotemporelle NDVI – Pluviométrie sur le domaine cultivé

Les trois pays avec la tendance à l'augmentation de NDVI la plus forte sont le Tchad, le Mali et le Sénégal (8.3%, 31.1% et 38.8%) par contre les pays avec une tendance à la diminution sont le Bénin, République démocratique du Congo, Guinée équatoriale, Guinée, Niger, Nigeria et Sierra Leone (respectivement 37.1%, 71.1%, 100%, 28.4%, 58.2%, 38% et 100%) (Tableau 9)

Tableau 9. Tendance du NDVI sur le domaine cultivée (ha) par pays

	Tendance du NDVI sur le domaine cultivée > 30% par pays							
Pays	Diminution	% Dim	Stagnation	% Stag	Augmentation	% Aug	Surface cultivée	Surface Total
Bénin	1 248 277	37.1	2 114 644	62.9	0	0.0	3 362 920	11 600 541
Burkina Faso	58 479	0.5	14 497 595	96.9	408 382	2.7	14 964 457	27 439 896
Cameroun	988 350	16.2	5 100 932	83.8	0	0.0	6 089 281	46 825 075
République Centrafricaine	0	0.0	1 686	100.0	0	0.0	1 686	28 358 814
Tchad	2 554 255	24.2	7 124 843	67.5	874 226	8.3	10 553 324	82 625 731
Congo-Brazzaville	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	14 124 644
Côte d'Ivoire	764 465	5.3	13 041 308	90.9	536 105	3.7	14 341 878	32 512 540
R.D. du Congo	54 346	71.1	22 143	28.9	0	0.0	76 489	10 618 976
Guinée équatoriale	9 712	100.0	0	0.0	0	0.0	9 712	2 707 929
Gabon	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	9 210 353
Gambie	0	0.0	1 033 193	98.8	12 288	1.2	1 045 481	1 055 858
Ghana	1 484 622	12.7	10 197 827	87.3	0	0.0	11 682 449	23 943 964
Guinée	147 475	28.4	371 455	71.6	0	0.0	518 929	24 619 685
Guinée-Bissau	0	0.0	126 356	100.0	0	0.0	126 356	3 371 255
Liberie	0	0.0	110 253	100.0	0	0.0	110 253	9 628 845
Mali	0	0.0	8 947 785	68.9	4 041 624	31.1	12 989 409	95 485 633
Mauritanie	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	53 362 124
Niger	793 902	58.2	570 411	41.8	0	0.0	1 364 313	94 580 144
Nigeria	19 718 773	38.0	32 068 812	61.8	110 356	0.2	51 897 942	91 287 153
Sao Tome and Principe	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	100 484
Sénégal	0	0.0	4 543 986	61.2	2 880 648	38.8	7 424 634	19 725 533
Sierra Leone	406 160	100.0	0	0.0	0	0.0	406 160	7 259 274
Togo	408 144	18.0	1 862 063	82.0	0	0.0	2 270 207	5 727 515
Total général	28 636 959	20.6	101 735 293	73.1	8 863 629	1.3	139 235 882	696 171 967

En ce qui concerne la corrélation entre NDVI et pluviométrie dans les zones cultivées, les résultats sont très similaires à ceux obtenus sur toute la surface sans discrimination particulière des zones cultivées.

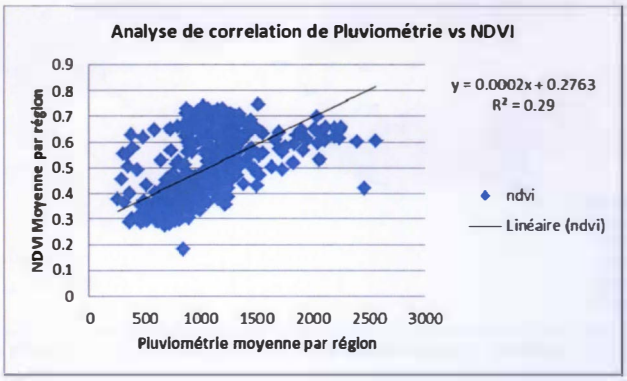


Figure 31. Analyse de corrélation de la pluviométrie et le NDVI dans des zones cultivées

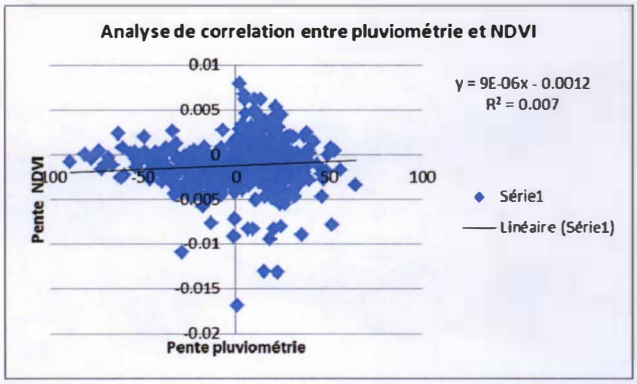


Figure 32. Corrélation entre les tendances de la pluviométrie et celle du NDVI dans des zones cultivées

Bien que l'analyse a été effectuée uniquement dans les zones de culture, nous trouvons qu'il y a une réponse très similaire à celle trouvée dans la zone sud sur l'ensemble Afrique de l'Ouest, ce qui confirme une fois de plus une manque de corrélation entre le NDVI et la pluviométrie dans cette région.

3.5. Analyses de surfaces agricoles

A partir des cartes du domaine cultivé de 2002 (Figure 33) et 2008 (Figure 34), nous avons produit une carte de changement des surfaces cultivées pendant la période 2002-2008 (Figure 35).

Le domaine cultivé évolue peu pendant cette courte période : 92% de la surface de la zone d'étude a un changement des surfaces agricoles inférieurs à 5% (Tableau 10).

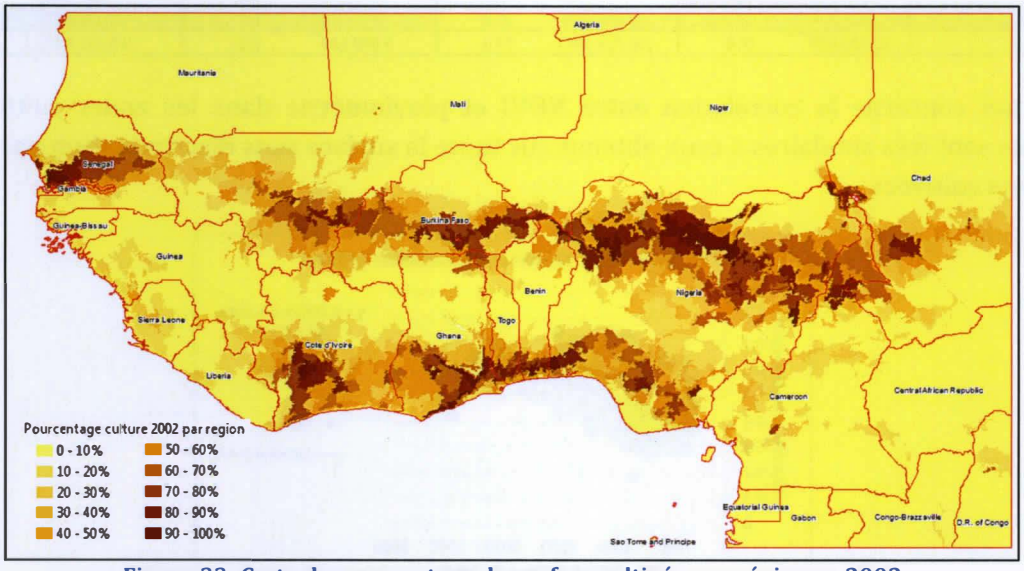


Figure 33. Carte de pourcentage de surface cultivée par région en 2002

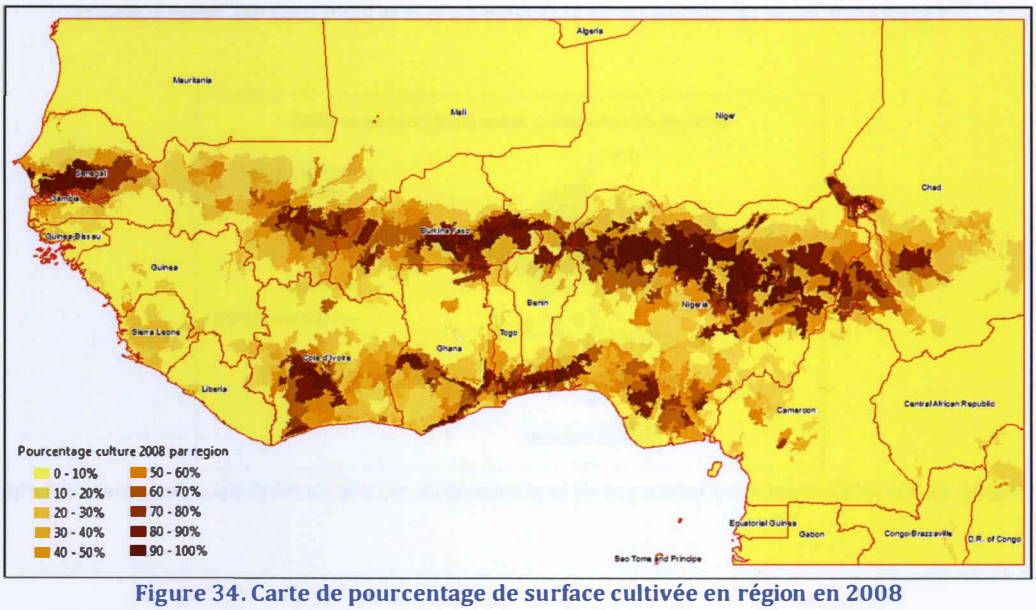


Figure 34. Carte de pourcentage de surface cultivée en région en 2008

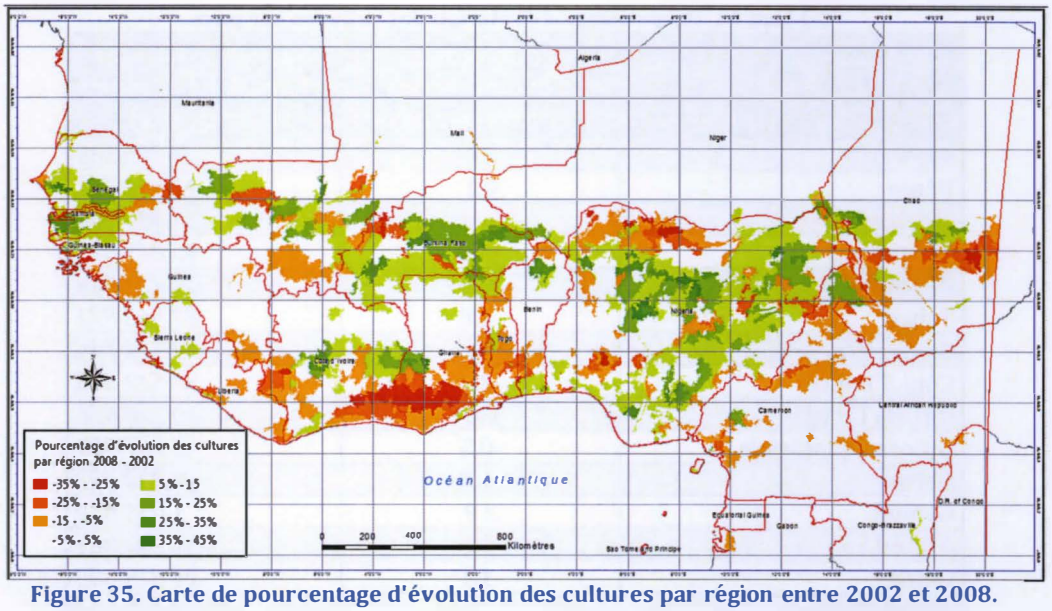


Figure 35. Carte de pourcentage d'évolution des cultures par région entre 2002 et 2008.

Cependant, aux échelles nationales certains pays ont une évolution non négligeable. On peut citer le Burkina Faso, Nigeria et Sénégal (respectivement 6.4%, 16.8% et 4.6%) qui sont des pays qui ont une augmentation « importante » de leur domaine cultivé, et à l'inverse, on peut citer le Cameroun et le Ghana qui montrent le plus fort taux de décroissance des surfaces cultivées de la région (respectivement -5% et -8.5%) (

Tableau 11).

Tableau 10. Pourcentage d'évolution des cultures entre 2002 et 2008 par classe.

Gamme d'évolution	Surface (ha)	% Surface
-35 - -25%	74	0.00001%
-25 - -15%	103	0.00001%
-15 - -5%	23 997 970	3.43409%
-5 - 5%	646 623 360	92.53124%
5 - 15%	27 600 501	3.94961%
15 - 25%	592 987	0.08486%
25 - 35%	1 198	0.00017%
35 - 45%	55	0.00001%
Total général	**698 816 249**	***100%***

Tableau 11. Pourcentage d'évolution des cultures par pays

Pays	Pourcentage d'évolution des cultures par pays	Surface Totale du Pays dans la zone d'étude (ha)
Algérie	0.0	*2 705 329*
Bénin	0.1	*11 600 541*
Burkina Faso	***6.4***	*27 439 896*
Cameroun	***-5.0***	*46 825 075*
République Centrafricaine	-0.4	*28 358 814*
Tchad	-1.8	*82 565 821*
Congo-Brazzaville	0.0	*14 124 644*
Côte d`Ivoire	-2.7	*32 512 540*
R.D. du Congo	0.0	*10 618 976*
Guinée équatoriale	-0.5	*2 707 929*
Gabon	-1.0	*9 210 353*
Gambie	2.8	*1 055 858*
Ghana	***-8.5***	*23 943 964*
Guinée	-1.4	*24 619 685*
Guinée-Bissau	1.1	*3 371 255*
Liberie	-1.1	*9 628 845*
Mali	1.0	*95 485 590*
Mauritanie	0.0	*53 362 124*
Niger	0.5	*94 580 144*
Nigeria	***16.8***	*91 286 058*
Sao Tome and Principe	0.0	*100 484*
Sénégal	***4.6***	*19 725 533*
Sierra Leone	1.1	*7 259 274*
Togo	-0.6	*5 727 515*

En comparant avec des statistiques nationales ...

Si l'on compare ces résultats nationaux aux chiffres des surfaces cultivées de l'AFD, on constate qu'effectivement les pays les plus dynamiques en termes d'agriculture sont le Nigeria, le Sénégal, le Burkina Faso et le Mali entre les plus importants. Cependant l'AFD cite le Cameroun comme un pays avec une tendance à la hausse, alors que nos résultats montrent une diminution générale. Les groupes de produits que l'AFD présente comme les plus remarquables selon le pays sont principalement donnés en Tableau 12.

Tableau 12. Pays en Afrique de l'Ouest avec plus de dynamique agricoles par groupe de produits.

Pays vs Produit	Céréales	Tubercules	Arachide	Niébé
Nigeria	X	X	X	X
Nord Cameroun	X		X	X
Côte d'Ivoire	X		X	
Bénin	X		X	X
Mali	X		X	
Guinée		X	X	
Ghana		X	X	
Burkina faso	X	X	X	X
Sénégal	X		X	X

Cependant il faut rappeler que la dynamique de changement de la production agricole peut être due soit à la dynamique du rendement moyen de la culture, soit à la dynamique des surfaces cultivées. (Figure 5). Selon l'AFD, les produits qui seraient tirés par la surface cultivée sont : Nigeria (sorgho, mil, niébé, riz), le Burkina Faso (sorgho) et le Sénégal (sorgho et maïs). Les autres produits ont une dynamique plus nuancée pour le rendement (Figure 5). Dans le cas de Nigeria, Burkina-Faso et Cameroun avec des produit comme le riz la hausse des surfaces s'est accompagnée d'une baisse des rendements ; cela est pour partie lié à l'extension des surfaces en riz pluvial (AFD - CIRAD - FIDA, 2011).

Concernant les tendances à l'augmentation de la production en tenant en compte à la fois les rendements et les surfaces cultivées, nos résultats sont en accord avec 5 pays cités parl'AFD (Tableau 13, Annexe 6 et Annexe 7) : le Burkina Faso, le Tchad, le Mali, le Nigeria et le Sénégal.

3.6. Analyse des tendances de production

Lorsqu'on fait la synthèse des résultats obtenus en matière de tendances observées de NDVI, et de surfaces agricoles, on peut essayer de tirer des conclusions sur la tendance générale des productions agricoles au cours des dix dernières années.

Ainsi, les pays pour lesquels on peut s'attendre à une augmentation de la production sont le Burkina Faso, Mali, Chad, Nigeria et Sénégal principalement et contrairement les pays dans lesquels on peut s'attendre à une diminution de la production sont la République Démocratique du Congo, et Guinée Equatoriale principalement. Selon les données de la FAO, le plus gros producteur de la région est le Nigeria, dont la production a atteint 48% de la production, en 2008 (FAO cité par AFD - CIRAD - FIDA 2011).

Pays	TLD Surface	TLD NDVI	TOTAL	TLD	AFD
Bénin	0	-1	-0.5	↘	↗
Burkina Faso	1	0	0.5	↗	↗
Cameroun	-1	-1	-1	↘	↗ Faible
Central African Republic	0	0	0	↘	
Chad	0	1	0.5	↗	↗
Congo-Brazzaville	0	0	0	-	
Cote d'Ivoire	0	0	0	-	↗ Faible
D.R. of Congo	0	-1	-0.5	↘	
Equatorial Guinea	0	-1	-0.5	↘	
Gabon	0	0	0	-	
Gambie	0	0	0	-	↗ Faible
Ghana	-1	-1	-1	↘	
Guinée	0	-1	-0.5	↘	↗
Guinée-Bissau	0	0	0	-	↗ Faible
Libéria	0	0	0	-	↗ Faible
Mali	0	1	0.5	↗	↗
Mauritanie	0	0	0	-	↗ Faible
Niger	0	-1	-0.5	↘	↗
Nigeria	2	-1	0.5	↗	↗
Sénégal	1	1	1	↗	↗
Sierra Leone	0	-1	-0.5	↘	↗
Togo	0	0	0	-	↗ Faible

Tableau 13. Comparaison des résultats de tendances dans le domaine cultivé avec des statistiques nationales de l'AFD

4. CONCLUSION

Dans cette recherche, nous avons analysé la variabilité du NDVI comme indicateur de la production agricole à l'échelle des paysages radiométriques homogènes en Afrique de l'Ouest entre 2002 et 2011. Pour cela on a utilisé des données MODIS (NDVI et cartographie des surfaces agricoles), et des données R.F.E. comme source de données pluviométriques. L'analyse des données a consisté à mener des analyses de tendances et des analyses statistiques.

Au niveau régional nous trouvons que les pays avec les plus fortes tendances à l'augmentation de NDVI dans le domaine cultivée supérieur à 30% sont le Sénégal, le Mali et le Tchad avec respectivement 38.8%, 31.3%, 8.3% et 8.18% de leur surface totale, en revanche les pays qui présentent les plus grandes tendances à la diminution de NDVI sont la Guinée Equatoriale, la République démocratique du Congo et le Sierra Leone, avec respectivement 100%, 71.1% et 100% de leur surface totale.

Du point de vue méthodologique, nous avons montré que l'approche orientée objet peut être appliquée pour obtenir des segmentations à l'échelle régionale avec des images à moyenne résolution comme celles acquises par le capteur. En analysant différentes segmentations, nous trouvons que la segmentation avec 300 comme paramètre d'échelle est sur-segmentée. En prenant en compte la dimension régionale de notre étude, nous avons décidé de prendre la segmentation avec le paramètre d'échelle 500 comme la plus ajustée à nos objectifs.

Cette étude montre qu'à l'échelle sous régionale en Afrique de l'Ouest la sensibilité du NDVI aux précipitations peut varier spatialement et temporellement et que la corrélation augmente lorsque les variables sont analysées suivant la zone géographique. Il existe une relation entre les tendances de production primaire et celles de la pluie annuelle dans la zone nord soudano-sahélienne, ce qui montre que la pluie pourrait être un facteur explicatif de l'augmentation de la production dans cette zone. Par contre il n'y a pas de corrélation entre les tendances de NDVI et les tendances de la pluviométrie dans la zone soudanienne et guinéenne ce qui nous montre qu'il faudra chercher d'autres facteurs de variation que le NDVI.

Les résultats obtenus dans cette étude permettent de fournir d'information à l'échelle sous-nationale ce qui devient un plus et un avantage méthodologique très intéressant par rapport aux statistiques agricoles qui présentent l'information généralement à l'échelle nationale.

Il est important de noter que la sécurité alimentaire est l'un des principaux objectifs des gouvernements mais au même temps parmi cet objectif il est possible le développement économique, car elle détermine la demande de main-d'œuvre agricole, donc dans les pays à faible développement agricole ou tendance à la baisse come le Ghana (-8.53) et le Cameroun (-5.04) il est nécessaire de faire connaissance des résultats de la part des gouvernements afin de générer les actions nécessaires pour éviter les effets négatifs socio-économiques ou sur l'environnement toujours en contrastant les résultats avec de statistiques propres à chaque pays et différentes sources officielles afin de confirmer tels situations.

Les pays plus stables avec des taux élevés d'évolution dans les zones agricoles sont le Nigeria (16,83%), Burkina Faso (6,43%) et le Sénégal (4,57%) ce qui devient un indicateur aussi du développement agricole dans la région ceux résultats étant cohérentes avec les statistiques nationales présentés pour l'AFD.

Limites de l'étude...

- Une période de 10 ans peut être courte dans le temps pour voir les évolutions de nos variables. Le nombre limité d'années pourrait réduire la signification d'une tendance cohérente dans les résultats de p-value, en particulier dans les zones plus humides où la variation inter-saisonnière est inférieure à celle du Sahel (Fensholt & K. Rasmussen 2011).

- La précision de certaines données utilisées peut être insuffisante pour voir des changements subtils :
  - La présence de nuages principalement durant les mois d'août et septembre dans tous les pays du sud de l'Afrique de l'Ouest a été l'un des problèmes majeurs rencontrés qui pourraient causer une corrélation faible en raison de l'absence de données.
  - La qualité des cartes d'occupation du sol, et en particulier la qualité de la « culture » DES PRODUITS UTILISES.
  - La qualité des données pluviométriques.
- La longueur de la période considérée de 5 ans pour l'étude des changements d'occupation des sols est surement insuffisante.

5. RECOMMANDATIONS

Suite aux limites identifiées précédemment, on recommande :

- Refaire l'étude sur une période plus longue (données AVHRR sur 30 ans, mais à 8 km de résolution)

- Tester différentes sources de données de pluie.

- Remplacer le NDVI par l'EVI (*Enhanced Vegetation Index*) et étudier les avantages et désavantages d'un et l'autre pour le suivi de la dynamique végétale.

- Etudier plus en détail des sites test choisis sur la base de la présente étude.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AFD - CIRAD - FIDA, 2011. Les cultures vivrières pluviales en Afrique de l'Ouest et du Centre. Available at: http://www.afd.fr/webdav/site/afd/shared/PUBLICATIONS/RECHERCHE/Scientifiques/A-savoir/11-A-Savoir.pdf [Consulté septembre 8, 2012].

AFD, CIRAD, FIDA, 2011. Les cultures vivrières pluviales en Afrique de l'Ouest et du Centre. Available at: zotero://attachment/257/ [Consulté septembre 8, 2012].

Alatorre, L.C., Beguería, S. & Vicente-Serrano, S.M., 2010. Análisis de la evolución espacio-temporal del NDVI sobre áreas vegetadas y zonas de riesgo de erosión en el Pirineo Central. *Pirineos*, 165(0), p.7-27.

Benz, U.C., Hofmann, P., Willhauck, G., Lingenfelder, I. & Heynen, M., 2004. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58(3–4), p.239-258.

Beyene, E.G. & Meissner, B., 2010. Spatio-temporal analyses of correlation between NOAA satellite RFE and weather stations' rainfall record in Ethiopia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12, p.S69-S75.

Borsotti, M., Campadelli, P. & Schettini, R., 1998. Quantitative evaluation of color image segmentation results. *Pattern Recognition Letters*, 19(8), p.741-747.

Bricas, N., 2009. Bassins de production et de consommation des cultures vivrières en Afrique de l'Ouest et du Centre. *Rapport Provisoire, CIRAD, AFD, CILSS, FIDA.*

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 Sensing of Environment*, 106(2), p.199-216.

Delire, C., Ngomanda, A. & Jolly, D., 2008. Possible impacts of 21st century climate on vegetation in Central and West Africa. *Global and Planetary Change*, 64(1–2), p.3-15.

FAO, 2007. *Developing a Strategy for Global Agricultural Monitoring in the Framework of Group on Earth Observations (GEO) Workshop Report*, Available at: http://www.earthobservations.org/documents/cop/ag_gams/200707_01/20070716_geo_igol_ag_workshop_report.pdf [Consulté avril 14, 2012].

Farrar, T.J., Nicholson, S.E. & Lare, A.R., 1994. The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. II. NDVI response to soil oisture. *Remote Sensing of Environment*, 50(2), p.121–133.

Fensholt, R. & Rasmussen, K., 2011. Analysis of trends in the Sahelian 'rain-use efficiency' using GIMMS NDVI, RFE and GPCP rainfall data. *Remote Sensing of Environment*, 115(2), p.438-451.

Fensholt, R., Sandholt, I., Rasmussen, M.S., Stisen, S. & Diouf, A., 2006. Evaluation of satellite based primary production modelling in the semi-arid Sahel. *Remote Sensing of Environment*, 105(3), p.173-188.

Formation continue UMR TETIS AgroParisTech., 2009. Analyse orientée objet d'images de télédétection. Prise en main de eCognition Developer.

Haralick, R.M. & Shapiro, L.G., 1985. Image segmentation techniques. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 29(1), p.100-132.

https://lpdaac.usgs.gov, 2012. Land Cover Type Yearly L3 global 500m - MCD12Q1. Available at: https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/land_cover/yearly_l3_global_500_m/mcd12q1 [Consulté avril 13, 2012].

Li, J., Lewis, J., Rowland, J., Tappan, G. & Tieszen, L.., 2004. Evaluation of land performance in Senegal using multi-temporal NDVI and rainfall series. *Journal of Arid Environments*, 59(3), p.463-480.

López-Ornelas E., Sèdes F., Flouzat G. & Laporterie-Déjean F., 2005. Une approche objets pour la description des images à très haute résolution spatiale et l'extraction de connaissances. *Télédétection*, 5(1-2-3), p.261-273.

Rouse, J.W., Haas, J.W., Schell, J.A. & Deering, D.W., 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Proceedings of the Third ERTS, Symposium.*, 1., p.309 - 317.

TETIS, 2012. Available at: http://tetis.teledetection.fr/index.php/fr/component/jdownloads/finish/3/104 [Consulté septembre 6, 2012].

Tracol, Y., 2004. *Etude des variations interannuelles de la production herbacée des pâturages sahéliens: Exemple du Gourma malien.* Université Toulouse III - Paul Sabatier.

Zhang, X., Xiao, P. & Feng, X., 2012. An Unsupervised Evaluation Method for Remotely Sensed Imagery Segmentation. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 9(2), p.156-160.

ANNEXES

Annexe 1. MOD13A1 Pixel Reliability

Rank Key	Summary QA	Description
-1	Fill/No Data	Not Processed
0	Good Data	Use with confidence
1	Marginal data	Useful, but look at other QA information
2	Snow/Ice	Target covered with snow/ice
3	Cloudy	Target not visible, covered with cloud

Annexe 2. Script R pour le calcul de tendances

```
# n1 et n2 : nombres des 1ers et derniers polygones à traiter
#-----------------------------------------------------------------------
windows(record=T)
install.packages("foreign")
library("foreign")

frame()

data <- read.csv("Seg_700_0.7_0.9.csv",header=T,sep=";")

tps = c(1:10)

# Nombre de polygones : n2
#
n1 = 1
n2 = length(data[,1])
print("Nombre de polygones : ")
print(n2)

ndvi = data.matrix(data[,3:12],)
ndvi[ndvi==0] = NA
colnames(ndvi) <- c("2002", "2003","2004", "2005", "2006", "2007", "2008", "2009", "2010",
"2011")
surf = data[,1]

ymin = min(ndvi[!is.na(ndvi)])
ymax = max(ndvi[!is.na(ndvi)])

# Initialisation des tableaux
#
pvalue = matrix(NA, nrow=nrow(ndvi), ncol=1)
tend   = matrix(NA, nrow=nrow(ndvi), ncol=1)
slope  = matrix(NA, nrow=nrow(ndvi), ncol=1)

par(mfrow=c(3,3))

#Représentation graphique des données
#-----------------------------------------------
```

```
for (i in c(n1:n2)){
yy = ndvi[i,][!is.na(ndvi[i,])]

# Test sur le nombre de points : si < à 5, on ne calcul pas la régression
#
if (length(yy) < 5) {
                        pvalue[i]=NA
                        tend[i] = NA
                        slope[i]=NA}
else{

xx = tps[!is.na(ndvi[i,])]

plot(xx,yy,xlab="Years",ylab="Annual NDVI",ylim=c(ymin,ymax))
tendance  <- lm(yy ~ xx, na.action=na.omit)

fitted.value=predict(tendance)
lines(fitted.value,lty=2)

#print(summary(tendance))
slope[i] = coef(summary(tendance))[2]
#print(slope[i])
pvalue[i] = coef(summary(tendance))[8]
#print(pvalue[i])

if (pvalue[i] < 0.1 & slope[i] >0)                {tend[i] = 1}
        else if (pvalue[i] < 0.1 & slope[i] <0) {tend[i] = -1}
        else                                      {tend[i] = 0}

# Ecriture des valeurs sur le graphique
#

toto = paste("p-value = ",format((pvalue[i]*100),digits=2)," %", "slope =
",format(slope[i],digits=2))
if (pvalue[i] < 0.1 & slope[i] >0)                {mtext(toto, side = 3, line=1, cex=1.1, col="green")}
        else if (pvalue[i] < 0.1 & slope[i] <0) {mtext(toto, side = 3, line=1, cex=1.1, col="red")}
        else                                      {mtext(toto, side = 3, line=1, col="black")}


#if (pvalue[i] = NaN) {tend[i]=NA}
}}
sortie = cbind(surf,ndvi,slope,pvalue,tend)
print(sortie)
colnames(sortie) = c("Area","y2002", "y2003","y2004", "y2005", "y2006", "y2007", "y2008",
"y2009", "y2010", "y2011","slope","p-value","trend")

#

write.dbf(sortie,file="test_new.dbf",factor2char = TRUE, max_nchar = 254)
# renommer le fichier du nom de la couche excel test_new.dbf -> test.dbf dans ce cas
```

Annexe 3. Script IDL pour syntheses des images de NDVI

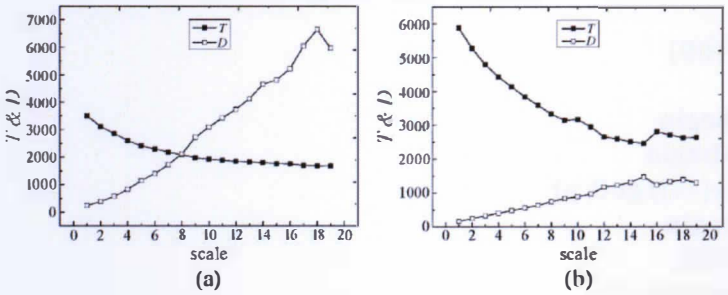
```
pro medias_indices_con_hdfs

close, /all

file=dialog_pickfile(path='D:\IMAGES\terra\HDF_TERRA\hdf2006\',/multiple_files,
filter='*.hdf')
dim=size(file)
print, size(dim)


a =
QUERY_TIFF('D:\IMAGES\terra\HDF_TERRA\Images_mean\IDL\Tuile_h16v07_tif_2006_2010\
synth2007NDVI_h16v7.tif', GEOTIFF=geotiff)

año=2006
ano=string(año)

 val=strcompress(string(file(0)), /remove_all)
 partes=STR_SEP(val, '\')
 Npar=size(partes)
 val2=strcompress(string(partes(Npar(1)-1)),/remove_all)
 partes2=STR_SEP(val2, '.')
 Npar2=size(partes2)

 tuile=string(partes2(2))


fileout='D:\IMAGES\terra\HDF_TERRA\hdf2006\Synthesis\synth'+ano+'_'+tuile+'.tif'


synthe=fltarr(23,2400,2400)

for v=0, dim(1)-1 do begin

 arxiu=HDF_SD_START(file(v), /READ)
 ndvi_id=HDF_SD_SELECT(arxiu, 0)
 reliability_id=HDF_SD_SELECT(arxiu, 11)

 HDF_SD_GETDATA, ndvi_id, ndvi
 HDF_SD_GETDATA, reliability_id, relia
 HDF_SD_END, arxiu

 q=where(relia eq 1 or relia eq 0, p)

 prov=fltarr(2400,2400)
 prov(*,*)=0
 prov(q)=ndvi(q)*0.0001

 synthe(v,*,*)=prov(*,*)
```

```
endfor


res=fltarr(2400,2400)

 for i=0, 2399 do begin
  for j=0, 2399 do begin
   q=where(synthe(*,i,j) gt 0, p)
    if p gt 2 then begin
       b_ndvi=fltarr(p)
       b_ndvi(*)=synthe(q,i,j)
       media1=moment(b_ndvi, sdev=stdev1)
       res(i,j)=media1(0)
;        stop
    endif
   endfor
 endfor

fileout2='D:\IMAGES\terra\HDF_TERRA\hdf2006\Synthesis\mean'+ano+'_'+tuile+'.tif'; nombre
de imagen de salida de la media

write_tiff, fileout, synthe, /float, GEOTIFF=geotiff
write_tiff, fileout2, res, /float, GEOTIFF=geotiff

end
```

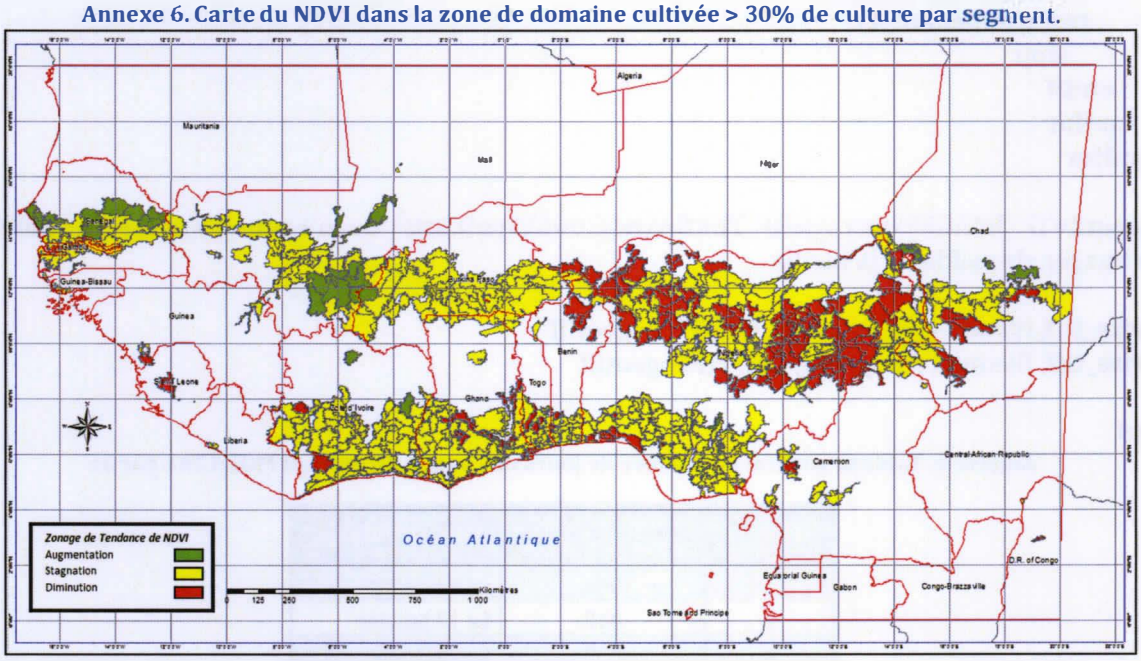
Annexe 4. Tableau général de nombre de jours de l'année du produit MOD13A1 par an

N°	Nombre de jours de l'année	Date de l'image
1	001	Le 1 janvier
2	017	Le 17 janvier
3	033	Le 2 février
4	049	Le 18 février
5	065	Le 6 mars
6	081	Le 22 mars
7	097	Le 7 avril
8	113	Le 23 avril
9	129	Le 9 mai
10	145	Le 25 mai
11	161	Le 10 juin
12	177	Le 26 juin
13	193	Le 12 juillet
14	209	Le 28 juillet
15	225	Le 13 août
16	241	Le 29 août
17	257	Le 14 septembre
18	273	Le 30 septembre
19	289	Le 16 octobre
20	305	Le 1 novembre
21	321	Le 17 novembre
22	337	Le 3 décembre
23	353	Le 19 décembre

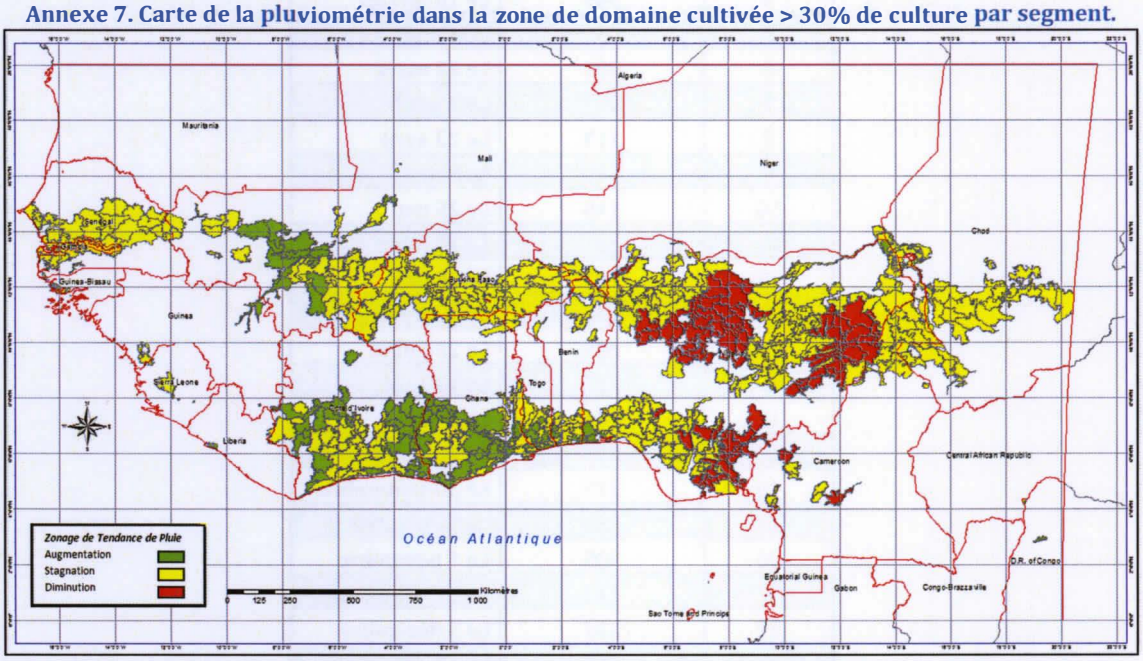
Annexe 5. Résultat de test de la méthode Zhang en utilisant deux différents logiciels. a) sur eCognition b) sur Edison



Annexe 6. Carte du NDVI dans la zone de domaine cultivée > 30% de culture par segment.



Annexe 7. Carte de la pluviométrie dans la zone de domaine cultivée > 30% de culture par segment.



Résumé

La sécurité alimentaire reste un sujet d'actualité en Afrique de l'Ouest. La définition des bassins de production ou de paysages homogènes est l'un des principaux points de départ pour la réalisation de notre objectif qui est d'analyser la dynamique des surfaces végétales et agricoles en lien avec le climat notamment la pluviométrie en Afrique de l'ouest sur les dix dernières années, à partir des séries temporelles d'images à moyenne résolution spatiale.

Les images MODIS ont été compilées sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest entre 2002 et 2011. Deux produits ont été utilisés dans cette étude : le produit MOD13A1, notamment la bande de synthèse 16 jours de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) et la bande de qualité (*pixel reliability*), et le produit MCD12Q1, à partir duquel nous avons extrait la bande *Land Cover Type 1.* Les deux produits ont une résolution spatiale de 500 mètres. Les images ont été prétraitées avec les logiciels Erdas et ENVI. L'analyse des tendances a été menée en deux temps : segmentation de l'espace régional et analyse des tendances de chaque segment.

Plusieurs segmentations ont été faites avec le logiciel eCognition. La qualité de ces segmentations a été évaluée de façon non supervisée à partir d'indicateurs statistiques issus de la bibliographie qui prennent en compte l'homogénéité intra-région et l'hétérogénéité inter-région. Les paramètres de segmentation les plus appropriés pour notre zone d'étude, sont : paramètres d'échelle : 500 ; critère de forme : 0.7 ; critère de compacité : 0.9.

L'analyse de tendances de la production végétale a été menée en traçant une régression linéaire entre le NDVI moyen annuel et les années pour chaque segment de l'espace sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest pendant les 10 ans. Nous avons trouvé une tendance du NDVI à la diminution de 20% de l'ensemble de la zone, à la stagnation de 72% et à l'augmentation de 8%.

L'analyse géographique des résultats montre que le Sénégal, la Mauritanie et le Mali sont les pays les plus touchés par une augmentation du NDVI (respectivement 35%, 24% et 18% de la surface du pays), alors que la République démocratique du Congo, la Guinée équatoriale et le Sierre Leone montrent une forte baisse du NDVI moyen sur la période avec respectivement 63%, 61% et 50% du territoire concerné.

A partir de la segmentation, une analyse des tendances de la pluviométrie a été menée avec la même méthode en utilisant des données satellitaires RFE de cumul pluviométrique. Les pays qui montrent une tendance à la diminution de la pluviométrie sont principalement la Guinée équatoriale, le Nigeria, le Gabon et le Cameroun (respectivement 42%, 37%, 31% et 21%). En revanche, on observe une augmentation de la pluviométrie dans le sud soudanien et guinéen, et l'on n'observe aucune tendance dans le nord sahélien.

Une régression linéaire entre les valeurs moyennes de NDVI et les précipitations ont été calculées, en obtenant une corrélation de 0,52 pour la zone soudano-sahélienne, et de 0.23 pour la zone guinéenne. Ces résultats sont sans surprise, et confirment que dans le sud de la zone d'étude, la pluie n'est pas un facteur limitant de la production végétale. Finalement, les pays avec la plus forte augmentation des surfaces agricoles sont le Nigeria, le Burkina Faso et le Sénégal (17%, 6% et 5% respectivement), et ceux qui ont la plus forte diminution sont le Ghana et le Cameroun (9%, 5%).

Abstract

Food security remains a hot topic in West Africa. The definition of production areas or homogeneous landscapes is one of the main starting points for achieving our objective which consists on analyzing the dynamics of plant and agricultural surfaces related to climate, especially rainfall in West Africa over the last ten years, from the time series of medium spatial resolution images.

MODIS images have been compiled on the entire West Africa between 2002 and 2011. Two products were used in this study: the MOD13A1 product, including a synthesis band of 16 days NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and a quality band (pixel reliability); and the product MCD12Q1, from which the Land Cover Type 1 band has been used. Both products have a spatial resolution of 500 meters. The images were preprocessed with the software Erdas and ENVI. Trend analysis was conducted in two stages: a first regional space segmentation was performed and the analysis of trends in each segment was extracted.

Several segmentations have been made with the eCognition software. The quality of the segmentation was evaluated from unsupervised statistical indicators from the literature that take into account the intra-region homogeneity and the inter-region heterogeneity. From the previous analysis the best segmentation parameters were: scale parameter: 500; shape: 0.7; compactness: 0.9.

The analysis of trends in vegetal production was conducted by plotting the average values of NDVI in each segment for the different years. A decreasing trend was found in 20% of the area, a stagnation in 72% of the area and an increasing trend in the resting 8%.

The geographical analysis of the results shows that Senegal, Mauritania and Mali are the most affected countries by an increase in NDVI (35%, 24% and 18% of the country's surface), while the Democratic Republic of Congo, Equatorial Guinea and Sierra Leone show a sharp decline in the average NDVI (63%, 61% and 50% of the territory).

From the segmentation, trend analysis of rainfall was conducted with the same method using satellite data RFE rainfall accumulation. Countries that show a decreasing trend in rainfall are mainly Equatorial Guinea, Nigeria, Gabon and Cameroon (42%, 37%, 31% and 21%). In contrast, we observed an increase in rainfall in the southern Sudanese and Guinean and there is no trend in the northern Sahel.

A linear regression between average values of NDVI and rainfall was calculated, obtaining a correlation of 0.52 for the Sudano-Sahelian zone, and 0.23 for the Guinean zone. These results are not surprising and confirm that in the south of the study area, rainfall is not a limiting factor for crop production. Moreover, the relation between the trend of NDVI and agricultural extent in each segment were analyzed, however the correlation obtained was not satisfactory, making necessary to add other variables such as crop yields. Finally, countries with the highest increase of agricultural land are Nigeria, Burkina Faso and Senegal (17%, 6% and 5% respectively), and those with the largest decrease are Ghana and Cameroon (9 %, 5%).

Resumen

La seguridad alimentaria es un tema polémico en Africa del Oeste. La definición de las áreas de producción o paisajes homogéneos es uno de los principales puntos de partida para el logro de nuestro objetivo el cual se centra en analizar la dinámica de la superficie vegetal y agrícola en relación con el clima especialmente la precipitación en África del Oeste durante los últimos diez años, utilizando series temporales de imágenes de media resolución espacial.

Imágenes MODIS fueron compiladas en toda África del Oeste entre 2002 y 2011. Dos productos fueron utilizados en este estudio: el producto MOD13A1, especialmente la banda de NDVI (Índice de Vegetación Normalizado) que esta conformada por una síntesis de 16 días y la banda de calidad (*pixel reliability*), el segundo producto MCD12Q1, del cual se utilizó la banda 1 que contiene el uso y cobertura de la tierra. Ambos productos tienen una resolución espacial de 500 metros. Las imágenes fueron pretratadas, con los programas Erdas y ENVI. Análisis de tendencias fueron realizados en dos etapas: la segmentación del espacio regional y el análisis de las tendencias de cada segmento.

Segmentaciones múltiples se realizaron con el software eCognition. La calidad de la segmentación se evaluó de forma no supervisada y a partir de indicadores estadísticos encontrados en la literatura tomando en cuenta la homogeneidad intra-región y la heterogeneidad inter-región. Los parámetros de segmentación más relevantes para nuestra área de estudio fueron los siguientes: parámetro de escala: 500; criterio forma: 0,7; criterio de compacidad: 0.9.

El análisis de las tendencias en la producción agrícola se realizó mediante regresión lineal entre el NDVI medio anual por segmento durante el periodo de 10 años en toda África del Oeste. Así se encontró una tendencia a la disminución de NDVI de 20%, el 72% se mantuvo se mantuvo estable y un aumento del 8% de la superficie total.

El análisis geográfico de los resultados muestra que Senegal, Mauritania y Malí son los países con el aumento de NDVI más alto (35%, 24% y 18% de la superficie del país respectivamente), mientras que República Democrática del Congo, Guinea Ecuatorial y Sierra Leona muestran una fuerte disminución en el NDVI promedio durante el período, con el 63%, 61% y 50% del territorio.

A partir de la segmentación, el análisis de tendencia de precipitación se llevó a cabo con el mismo método utilizando imágenes de satélite RFE que contienen datos de precipitación acumulada. Los países que muestran una tendencia a la disminución de las precipitaciones son principalmente de Guinea Ecuatorial, Nigeria, Gabón y Camerún (42%, 37%, 31% y 21% respectivamante). Por el contrario, se observó un aumento de las precipitaciones en el sur de la zona sudaneana y guineana y estabilización el norte del Sahel.

Una regresión lineal entre los valores medios de NDVI y las precipitaciones se calcularon, obteniendo un R^2 de 0,52 para la zona sudano saheliana, y 0,23 para la zona guineana. Estos resultados no son sorprendentes y confirman que en el sur del área de estudio, la precipitación no es un factor limitante para la producción agrícola. Por último, los países con el mayor aumento de las tierras agrícolas son Nigeria, Burkina Faso y Senegal (17%, 6% y 5% respectivamente), y los países con mayor descenso fueron Ghana y Camerún (9 %, 5% respectivamente).

DOCUMENTATION
MAISON DE LA TELEDETECTION
500, rue J.F. Breton
34093 MONTPELLIER CEDEX 5