DÉTECTION DES CHANGEMENTS DE LA COUVERTURE VÉGÉTALE AU SAHEL DURANT LA PÉRIODE 1982-2002 À PARTIR DES DONNÉES NDVI ET PRÉCIPITATION

José-Luis San Emeterio[1, 2], Bernard Lacaze[1], Catherine Mering[1, 2]

[(1)]Université Paris-Diderot Paris 7, Paris, France
[(2)]CNRS-UMR 8586 PRODIG, Paris, France
jose-luis.sanemeterio@univ-paris-diderot.fr, blacaze@univ-paris1.fr

Soumis le 28 janvier 2011 ; accepté le 16 juillet 2011 - © *Revue Télédétection*, 2011, vol. 10, n° 2-3, p. 135-143

Résumé :

Le suivi des changements de la couverture végétale au Sahel est nécessaire pour comprendre l'influence du changement climatique et l'influence anthropique directe sur ce milieu particulièrement fragile. Pour un suivi à une échelle régionale il faut faire appel à la télédétection spatiale. L'analyse des changements de la couverture végétale peut être effectuée à partir des données NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et elle peut être confrontée aux variations des données de précipitation spatialisées. Cependant il n'existe pas encore de consensus à propos de la méthode plus efficace pour effectuer un tel suivi. Dans ce travail nous avons testé plusieurs méthodes pour analyser les changements de la couverture végétale qui ont eu lieu entre 1982 et 2002. Les données utilisées sont le NDVI GIMMS (NASA/Global Inventory Modeling and Mapping Studies) et les données de précipitation du CRU (Climate Research Unit, version 2.1.). Les résultats concernent l'évaluation des méthodes pour le suivi de la couverture végétale à une échelle interannuelle et l'analyse de la relation NDVI-Précipitation pendant la période considérée.

Mots clefs : Sahel, couvert végétal, NDVI, précipitation, détection de changements.

ASSESSMENT OF VEGETATION COVER CHANGES IN THE SAHEL FROM NDVI AND RAINFALL DATA

Abstract :

Monitoring vegetation cover changes in the Sahelian area of Africa is required for understanding the effects of both climate fluctuations and human pressure on these very fragile environments. Remote-sensing is the only tool available for monitoring vegetation at a regional scale. Identifying vegetation cover changes can be inferred from the analysis of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) time series, which can be compared against the simultaneous temporal variations of spatialised rainfall data. However, there is presently no consensus about the identification of significant trends from the combination of both NDVI and rainfall data. The aim of this study is a comparative analysis of several methods for assessing vegetation cover changes in the Sahel during 2 decades (1982-2002). Input data are NDVI time-series from NASA/GIMMS (Global Inventory Modeling and Mapping Studies) and rainfall data from CRU (Climate Research Unit), version 2.1. Results are the evaluation of the methods for multi-year vegetation cover changes monitoring and the analysis of the NDVI-rainfall relationship during the studied time period.

Key words : Sahel, vegetation cover, NDVI , rainfall, change detection

1. INTRODUCTION

L´évaluation de la réversibilité de la dégradation et de la désertification liées au changement climatique et à la pression anthropique a été l'un de principaux enjeux scientifiques ces dernières années à propos du Sahel. A partir de 1994 on a constaté en effet une reprise de la végétation dans cette région, contrastant avec la dégradation due aux sécheresses des deux décennies précédentes. Le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) du capteur AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) de NOAA (*National Oceanographic and Atmospheric Administration*) a été très souvent utilisé pour faire ce constat. Cependant, la seule interprétation de l'augmentation du NDVI moyen sur cette vaste région ne permet pas de prendre en compte la forte variabilité des précipitations, laquelle peut masquer la réponse intrinsèque du couvert végétal aux précipitations. Dégradation et régénération, comprises comme correspondant respectivement à une diminution et une augmentation de la réponse de la végétation à une quantité donnée de précipitations utiles, sont

difficilement détectables à une échelle régionale. Dans la littérature, la plus part des auteurs remarquent une tendance à la récupération de la végétation dans l'ensemble du Sahel depuis les années 1990 et la controverse est située surtout à l'échelle sub-régionale où les auteurs trouvent parfois des résultats contradictoires en fonction de la période considérée et de la méthode utilisée. Les controverses sont toujours liées aux concepts de résistance et de résilience de la végétation, avec un souci d'évaluer les effets à long terme que les sécheresses des années 1970 - 80 ont eu sur le couvert végétal actuel, ainsi que de comprendre si ce couvert végétal pourrait encore résister à des sécheresses équivalentes dans le futur.

Dans cet article nous présentons les enjeux du rapport NDVI-précipitation et nous nous proposons d'évaluer les méthodes utilisées pour le suivi du rapport entre ces deux variables dans la bande sahélienne.

2. DONNÉES

Les données de précipitation utilisées sont celles du CRU (*Climate Research Unit)* version 2.1. produites par l'Université de East Anglia, Norwich, RU. Cette base des données inclut plusieurs variables climatiques pour la période 1901-2002. La variable précipitation pour la période 1981-2002 a été utilisée pour cette étude. Il s'agit de données mensuelles spatialisées avec une résolution de 0,5 degré ; elles sont obtenues exclusivement à partir de l'interpolation des données de stations météorologiques (Mitchell et Jones, 2005). Des problèmes liés à cette base ont été mentionnés par certains auteurs pour les régions très humides ou de fort relief, ce qui n'est pas le cas pour notre région d'étude. Il faut noter une précision moindre dans la deuxième partie de l'intervalle de temps étudié, due au fait qu'il y a moins de stations pluviométriques ; cependant, on peut considérer que la qualité globale du produit est satisfaisante pour notre étude. Cette base des données a été choisie car elle offre l'étalement temporaire nécessaire pour réaliser une analyse interannuelle et elle a une assez bonne résolution spatiale permettant une comparaison ultérieure avec les données NDVI.

Le NDVI est obtenu à partir des canaux 1 (rouge) et 2 (proche infrarouge) du capteur AVHRR sur NOAA. Cet indice est sensible à la densité et à la condition de la végétation et il est corrélé à la production primaire. Les données NDVI GIMMS (Global Inventory Modeling and Mapping Studies) ont été téléchargées à partir du site Internet Global Land Cover Facility (www.landcover.org). Cette base des données a été créée après la transformation des données originales en valeurs composites (synthèses temporelles) tous les 15 jours, avec une résolution de 8x8 km. La correction de la dégradation du capteur, des différences d'inter calibration, des angles de vue et les angles zénithaux solaires, des aérosols volcaniques etc. permettent une haute qualité de ces données (Tucker *et al*., 2005), qui ont déjà été utilisées dans plusieurs travaux (Anyamba & Tucker, 2005 ; Hermann *et al*., 2005 ; Camberlin *et al*., 2007 ; Helldén & Tottrup, 2008).

Toutes les données NDVI ont été ré-échantillonnées à la résolution des données de précipitation. Pour faire correspondre la résolution temporelle des deux bases de données, NDVI et CRU, on a moyenné les 2 images NDVI de chaque mois pour obtenir une image mensuelle.

3. MÉTHODES

La méthode principale développée pour cette étude vise à démêler la réponse intrinsèque de la végétation et la variabilité de la pluie. Pour cela on étudie l'évolution des résidus à partir de la modélisation de la relation NDVI - pluie. Le NDVI et la précipitation apparaissent bien corrélés pour l'ensemble du Sahel (Anyamba & Tucker, 2005 ; Hermann & Hutchinson, 2005 ; Olsson *et al*., 2005). On trouve généralement une relation linéaire entre ces deux variables au-dessous de 1000 mm de précipitation par an (Nicholson *et al*., 1990 ; du Plessis, 1999). Au delà de ce seuil, l'eau n'est plus un facteur limitant le développement du couvert végétal, et l'on peut considérer que cette relation devient logarithmique à cause de l'effet de saturation de la réponse de la végétation. Pour analyser et prendre en compte cette possible relation logarithmique entre la végétation et la pluie on a modélisé à la fois le rapport NDVI-Précipitation et le rapport NDVI – Log_ePrécipitation.

La région d'étude désignée s'étend entre 15° ouest et 21°est de longitude et 11,5° nord et 18° nord de latitude. Une grande partie du Sahel allant du Sénégal jusqu'au Tchad est ainsi englobée.

3.1. Méthode des résidus

L'analyse des résidus est basée sur la méthodologie développée dans les travaux d'Evans & Gerken (2004) en Syrie et de Wessels *et al.* (2007) en Afrique du Sud. Pour réaliser la modélisation de la relation NDVI-Précipitation à une échelle interannuelle on a cherché pour chaque année la valeur maximale de l'indice de végétation $NDVI_{max}$ et on a déterminé la période de précipitation qui conduisait à la meilleure corrélation $NDVI_{max}$-pluie. Plusieurs périodes de précipitation avec différents « lags » (décalage entre la période de précipitation et l'avènement du NDVI maximal) ainsi que différents nombres de mois d'accumulation des précipitations ont été utilisés. Dans les études menées sur cette thématique au Sahel on utilise habituellement une seule période de précipitation (Hermann *et al*., 2005), généralement 3 mois d'accumulation sans décalage, ou bien on utilise le NDVI annuel intégré pour la saison de croissance de la végéta-

tion avec une pluie annuelle cumulée[4]. Cette dernière approche a l'inconvénient de ne pas être capable de fournir une analyse intra-annuelle de la relation végétation-précipitation. Par ailleurs, une modélisation à 3 facteurs est requise (valeur de NDVI, durée de la saison de croissance et spécification de la période de cumul des pluies), tandis qu'une modélisation à partir du NDVI maximal exige seulement 2 facteurs : valeur de NDVI et spécification de la période de cumul des pluies (Evans & Geerken, 2004).

Pour réaliser les calculs de corrélations on a limité la recherche du NDVI maximal aux mois typiques du développement du couvert végétal pour le régime de mousson (juillet, août, septembre, octobre, novembre). La modélisation est réalisée pixel par pixel. La période de cumul de précipitations qui montre une corrélation plus forte avec $NDVI_{max}$ est utilisée pour réaliser le calcul des résidus à partir de la droite de régression pour chaque pixel. Seuls les pixels qui montrent une significativité statistique suffisante ont été utilisés : en général on a considéré les valeurs supérieures à $R = 0,5$ comme étant suffisamment significatives ($\alpha = 0.05$). L'évolution des résidus au cours de la période 1982-2002 est censée être un indicateur de la tendance évolutive de la couverture végétale pendant cette période.

3.2 RUE : Rain Use Efficiency

Le RUE (« Rain Use Efficiency », ou coefficient d'efficacité pluviale), que l'on peut définir ici comme le ratio entre la production primaire nette et la précipitation a été introduit pour la première fois par Le Houérou en1984. Prince *et al.* (1998), Symeonakis et Drake (2004) et Hountondji *et al.* (2006) ont proposé ce ratio pour le suivi de la dégradation de la végétation au Sahel à partir de données de télédétection. Ainsi, Houtondji *et al.* (2006) ont trouvé une dégradation prépondérante de Burkina Faso et du Niger à partir de l'analyse de l'évolution du RUE pendant les deux dernières décennies. Dans cette étude nous avons réalisé la même analyse en utilisant les données modélisées à partir de l'NDVI maximal annuel et la période de précipitation la mieux corrélée, ainsi que l'amplitude annuelle du NDVI et l'intégrale de du NDVI. L'intégrale de NDVI est définie comme l'intégrale de la différence entre la fonction qui décrit la courbe de croissance et le niveau de base au début et à la fin de la saison (Jönsson & Eklundh, 2004).

4. RÉSULTATS

4.1. NDVI maximal

L'étude de la date du NDVI maximal annuel s'avère très intéressante car elle est représentative du climat de la région étudiée et d'éventuels changements de date de $NDVI_{max}$ au cours des années peuvent refléter les changements qui ont eu lieu dans la zone étudiée. La figure 1 montre la distribution du NDVI maximal en région sahélienne au cours de la période 1982-2002. Pour affiner ce résultat, dans la figure 2 on a réalisé une composition colorée en divisant chaque année en trois périodes : saison humide, début de la saison sèche et fin de la saison sèche. De cette façon on peut avoir une idée de l'influence de plusieurs mois de NDVI maximal sur un seul pixel. Dans la figure 2 on peut constater la prépondérance du rouge dans les régions les plus au sud, liées au régime de mousson. Dans la région sahélienne limitrophe avec le désert on remarque le rouge, mais aussi le bleu (et la couleur magenta, résultat du bleu+rouge), ce qui implique une haute variabilité de la date de NDVI maximum pour la limite nord du Sahel et plus particulièrement pour les régions à prédominance pastorale (en contraste avec les régions agropastorales du Sahel situées au sud). On peut observer dans ces régions une dichotomie dans le comportement du NDVI, qui montre un maximum au mois de septembre voire au mois d'août pour les années bien arrosées et un maximum au mois de novembre et décembre pour les années sèches (1984, 1987, 1990…). Il est intéressant de constater que pour certaines régions les différences de NDVI maximum entre années sèches et années humides sont énormes pour les mois d'août et septembre, et ce point mériterait une étude plus approfondie. Dans la figure 3 on peut constater une évolution négative de la date de NDVI maximum (date plus précoce dans l'année) dans la limite nord sahélienne liée à la présence marquée d'années sèches pendant la période 1982-1992.

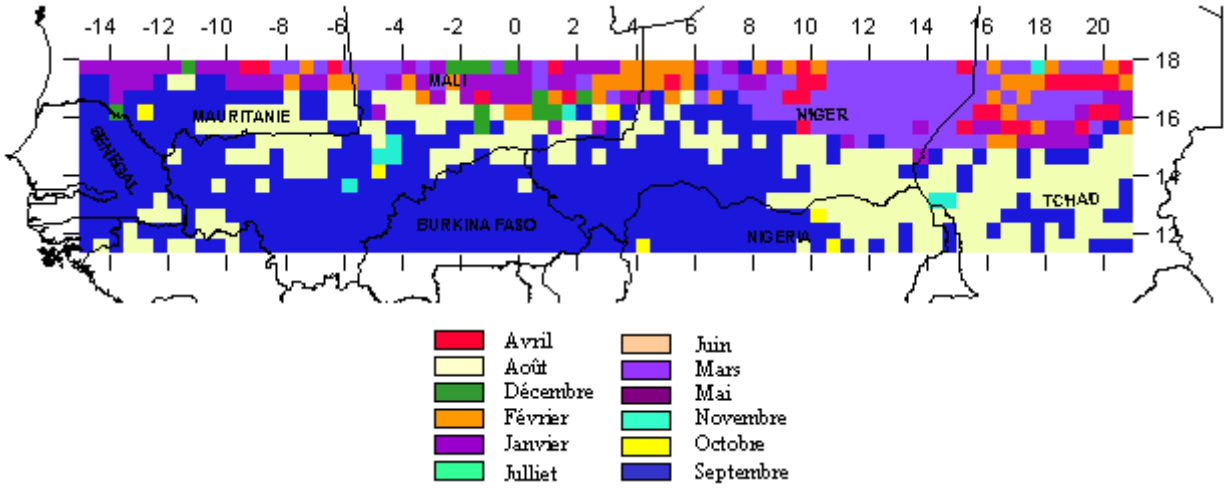


Figure 1. : Mois qui montre la plus grande probabilité de NDVI maximum au cours des années 1982-2006. Le fleuve Niger avec sa caractéristique forme en courbe traverse le Niger et le Mali.

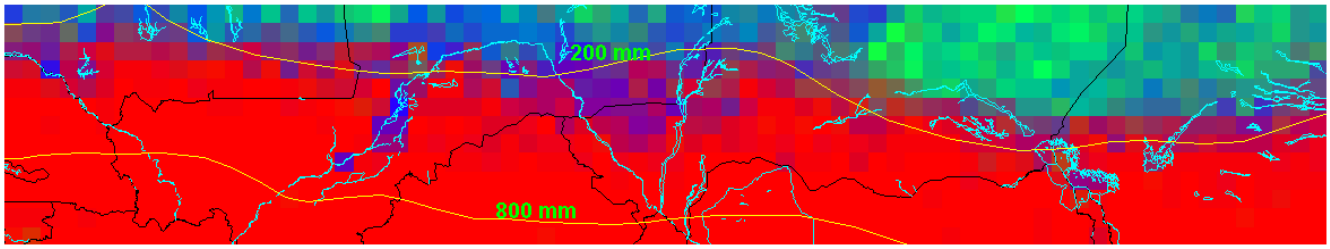


Figure 2. : Composition colorée: **ROUGE**: Somme des possibilités de trouver le NDVI maximum pendant les mois de juillet, août, septembre ou octobre au cours de la période 1982-2006. / **VERT**: Somme des possibilités de trouver le NDVI maximum pendant les mois de mars, avril, mai o juin au cours de la période 1982-2006. / **BLEU**: Somme des possibilités de trouver le NDVI maximum pendant les mois de novembre, décembre, janvier ou février au cours de la période 1982-2006. La première isohyète marque la limite des 200 mm de précipitation annuelle. La dernière isohyète, marque la limite de 800 mm de précipitation.

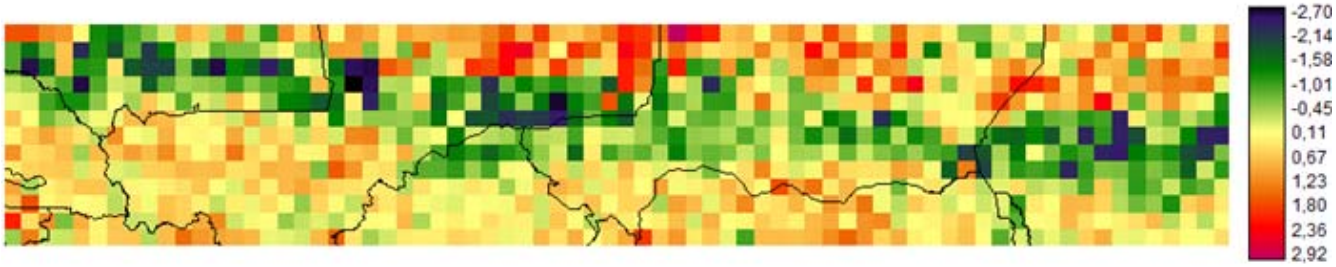


Figure 3. : Evolution de la date de NDVI maximum (en mois) de chaque année au cours de la période 1982-2002.

4.2 Rapport NDVI-Précipitation

La corrélation entre les variables précipitation et NDVI est très forte (Anyamba & Tucker, 2005 ; Hermann & Hutchinson, 2005 ; Olsson *et al*., 2005) pour la région sahélienne entre 200-500 mm de précipitation par an, avec un R moyen de 0,6. Les régions semi-arides montrent une forte corrélation entre ces deux variables car, dans ces régions, l'eau est le facteur limitant essentiel de la production primaire. Ceci limite la portée de notre étude aux régions semi-arides où la corrélation NDVI-Précipitation est suffisamment significative.

Dans la figure 4 on remarque la différence entre le régime désertique situé au-dessous d'une valeur $NDVI_{max}$ de 0,15, où la corrélation entre les deux variables augmente en même temps que la valeur NDVI (R= 0,63), et le régime de mousson, au-dessus de 0,15 de $NDVI_{max}$, où la corrélation entre les deux variables diminue au fur et à mesure que la valeur de NDVI augmente (R= -0,61).

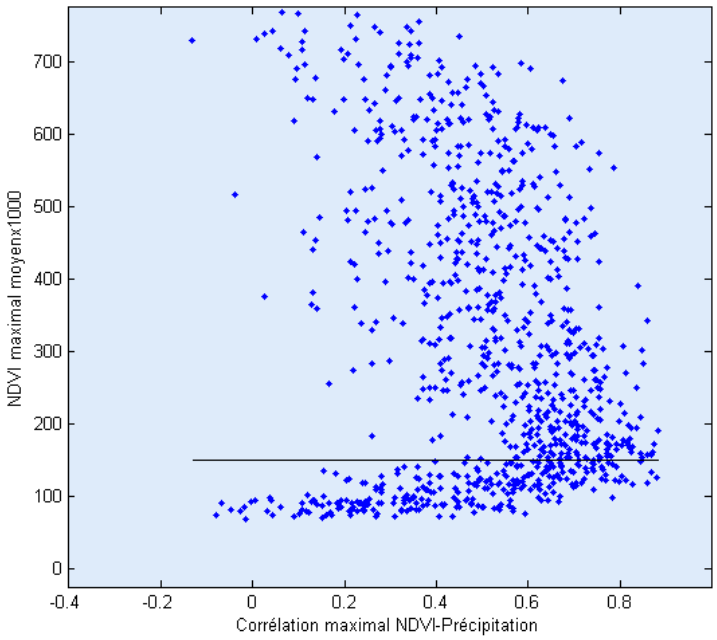


Figure.4 : Relation entre le NDVI maximum moyen au cours de la période 1982-2002 (utilisé comme indicateur de la couverture végétale typique sur un endroit donnée) et les corrélations maximales du rapport NDVI-Précipitation. La droite noire représente la limite entre le régime mousson et le régime désertique.

Les corrélations maximales par la méthode NDVI-Précipitation et NDVI-Log_ePrécipitation ont été comparées dans le but de comprendre quelle méthode rend les corrélations plus élevées, ce qui peut être considéré comme un indicateur de la qualité de la modélisation. La figure 5 montre la différence entre ces deux corrélations en fonction du NDVI maximal moyen pour la période 1982-2002. On peut constater que les corrélations maximales sont significativement plus fortes pour le rapport NDVI-Précipitation pour les faibles valeurs de $NDVI_{max}$; mais, à partir d'une valeur d'environ 0,35 de NDVI (400-500 mm de précipitation par an) on observe que les corrélations NDVI-Log_ePrécipitation sont légèrement plus fortes que celles de NDVI-Précipitation. Ceci peut être expliqué par l'effet déjà mentionné de saturation de la végétation pour les quantités de pluie élevées. L'affirmation que le rapport entre ces deux variables est linéaire au-dessous de 1000 mm (Nicholson *et al*., 1990) par an peut donc être discutée. Néanmoins, les résultats finaux obtenus par la méthode des résidus montrent très peu de différence entre les deux formulations ; nous avons donc décidé de n'utiliser par la suite le seul rapport NDVI-Précipitation.

La corrélation en fonction des périodes de précipitation utilisées est montrée au tableau 1. Les corrélations (R) sont en général assez faibles, car on a calculé la moyenne pour toute la région d'étude, y compris les régions plus humides typiques de climats soudanien et guinéen, ainsi qu'une partie de désert et régions très arides. Les corrélations maximales ont été, pour la plus grande partie des cas, des corrélations obtenues à partir de périodes de précipitation décalées de 0 et 1 « lag ».

Les différences entre les corrélations maximales trouvées et les corrélations minimales montrent, particulièrement pour le Sahel, une amplitude très grande. Cette forte variation des valeurs de corrélation peut être expliquée par la corrélation négative significative entre NDVI et précipitation pour des « lags » de 3 et 4 mois dans la région sahélienne. Ce résultat pourrait relever d'une relation inverse entre la précipitation au mois de juin et la couverture végétale au mois de septembre. Le Houérou (1987) montre que la variabilité de la pluie au Sahel présente une corrélation négative avec la moyenne annuelle, ce qui peut expliquer en partie les résultats obtenus, reliés directement aux caractéristiques de la mousson, mais aussi à la présence de plantes annuelles. D'ailleurs, non seulement la quantité de précipitation est importante, mais aussi la pluie qui a pu être effectivement utilisée par les plantes, c'est-à-dire la pluie utile. La précipitation peut quelquefois être néfaste pour les plantes, particulièrement quand elle arrive trop tôt ou en quantité excessive.

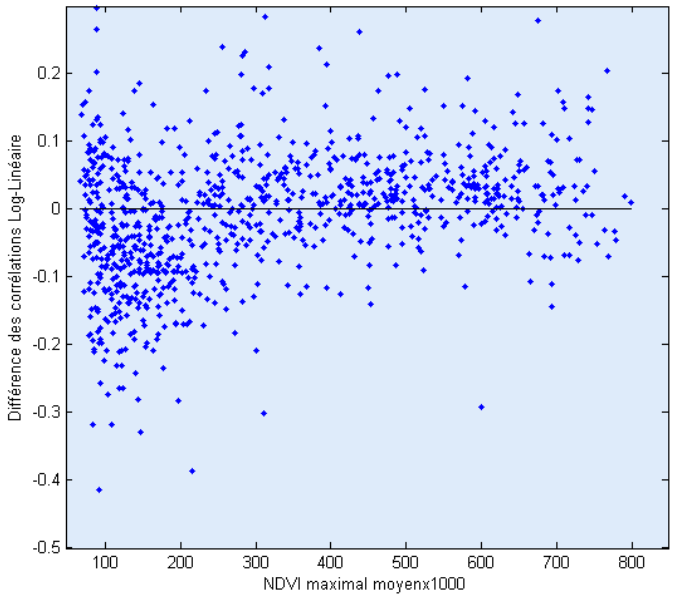


Figure.5 : L'axe y présente les différences entre les deux corrélations maximales obtenues à partir de la relation NDVI-Log$_e$Précipitation et la relation NDVI-Précipitation. L'axe x est NDVI maximum moyen au cours de la période 1982-2002 (utilisé comme indicateur de la couverture végétale typique sur un endroit donnée). Au-dessus de la droite noire la corrélation NDVI-LogNDVI est préférable et au-dessous cette droite la corrélation NDVI-Précipitation est préférable.

Tableau 1. Corrélations pour l'ensemble de la zone d'étude en fonction de différents lags et périodes d'accumulation de précipitation.

Corrélation NDVI-Précipitation	0 lag	1 lag	2 lags	3 lags	4 lags
1 mois	0,256	0,292	0,104	-0,141	-0,192
2 mois	0,349	0,254	-0,015	-0,181	-0,210
3 mois	0,350	0,171	-0,073	-0,195	-0,205
Corrélation NDVI-Log$_e$Préciptiation	0 lag	1 lag	2 lags	3 lags	4 lags
1 mois	0,302	0,301	0,093	-0,115	-0,157
2 mois	0,339	0,274	-0,008	-0,134	-0,165
3 mois	0,357	0,178	-0,049	-0,146	-0,164

4.3.Évolution des résidus

Pour mesurer l'évolution des résidus on a étudié leur corrélation avec le temps pour la période 1982-2002. La figure 7 montre la corrélation des résidus au cours de la période 1982-2002. Pour calculer les valeurs de la figure 6 on a réalisé une modélisation du rapport NDVI-Précipitation en utilisant la date de NDVI maximum pour l'ensemble de l'année. Les résultats obtenus montrent une dominance de corrélations positives, qui correspond à une tendance globale à la récupération dans la région sahélienne. On a uniquement pris en compte les pixels qui avaient montré une corrélation NDVI/Précipitation significative (R>0,5). Les résultats sont en concordance générale avec ceux publiés par Hermann *et al*. (2005), mais les résolutions spatiales des deux études ne sont pas identiques, rendant difficile la comparaison Il faut remarquer que le choix de la résolution spatiale reste limité par le manque de données pluviométriques de qualité à haute résolution.

L'évolution des résidus montre donc pour l'ensemble du Sahel une nette récupération du couvert végétal pour la période 1982-2002. On peut excepter quelques pixels isolés situés au Mali, Niger ou Tchad mais la tendance à la récupération est indéniable. Dans la figure 6 on montre un exemple de dégradation et un exemple de récupération de la végétation illustrés par la présentation simultanée des pluies et du NDVI. Des études plus approfondies restent nécessaires pour analyser, à une échelle plus fine, les différences trouvées entre le nord du Burkina Faso et le sud-ouest du Niger, ainsi que les différences trouvées entre les régimes à prédominance pastorale et les régimes agro-pastoraux.

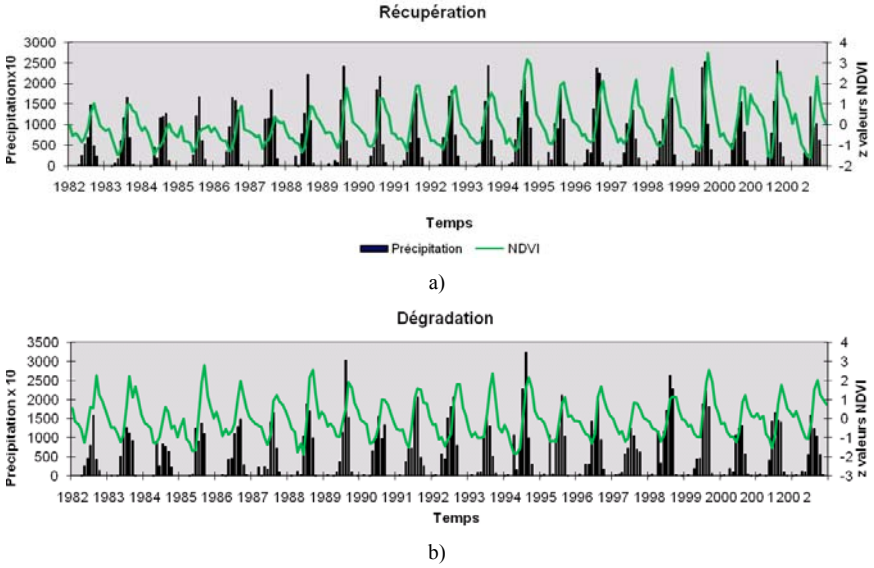


Figure 6. Exemples de zones où on trouve une récupération du couvert végétal (a) et une dégradation du couvert végétal (b).

4.4 Rain Use Efficiency

Le RUE est un indice qui a été souvent proposé pour le suivi de la dégradation en région semi-aride. Ici nous avons comparé les résultats obtenus à partir de la méthode des résidus et les résultats obtenus à partir du RUE. Les valeurs de RUE sont corrélées avec le temps dans le but d'étudier l'évolution de cet indice au cours de la période 1982-2002. Les résultats sont assez différents en fonction du NDVI utilisé et ne montrent en général que de faibles tendances peu significatives. On a utilisé pour réaliser ces calculs le $NDVI_{max}$ qui a le problème d'avoir un intercept (valeur de NDVI quand la pluie = 0) supérieur à 0 (c'est le NDVI du sol nu , avec éventuellement de la végétation sèche). Nous avons trouvé une tendance relativement significative à la dégradation dans l'ensemble du Sahel, résultat qui est influencé d'une part par l'intercept positif déjà signalé et d'autre part, par le fait que la deuxième partie de la période étudiée (1994-2002) est plus pluvieuse, sachant que le RUE et la précipitation présentent une corrélation négative de -0,63. L'option d'ajuster le NDVI par soustraction de l'intercept à partir de la modélisation NDVI-Précipitation donne un résultat similaire à celui obtenu par la méthode des résidus. Les autres options utilisées ont été le ratio entre l'amplitude annuelle de l'NDVI et la précipitation et le ratio entre l'intégrale de l'NDVI (telle qu'elle a été décrite plus haut, c'est-à-dire en soustrayant le niveau de base du NDVI au début et à la fin de la saison) et la précipitation, cette dernière approche résolvant le problème de l'intercept. L'intégrale du NDVI étant un indicateur plus robuste que l'amplitude de l'NDVI, on analysera les résultats obtenus à partir de l'intégrale du NDVI. Les résultats montrent que la corrélation entre la précipitation et le RUE est toujours significativement négative (R moyen = -0,55) pour l'ensemble du Sahel et augmente vers les climats soudanien et guinéen à cause de l'effet de saturation de la végétation pour les régions humides. Dans la figure 8 on peut observer le rapport entre le RUE et la précipitation. On observe un point d'inflexion autour de 300-400 mm, le RUE diminue pour des valeurs plus fortes de précipitation à cause de l'effet de saturation de la végétation ; en revanche, pour des valeurs plus faibles de précipitation le RUE diminue en raison de la plus faible productivité des zones arides. Des valeurs aberrantes de RUE sont observées pour les régions désertiques, comme conséquence de précipitations très faibles ou presque inexistantes. Même si on exclut ces valeurs aberrantes la corrélation négative entre RUE et précipitation pour l'ensemble des points étudiés persiste.

L'évolution du RUE pour la période 1982-2002 n'est pas significative (R moyen autour de 0) pour l'ensemble du Sahel. Certaines structures spatiales observées dans la méthode des résidus se répètent ici, mais les résultats diffèrent de manière importante.

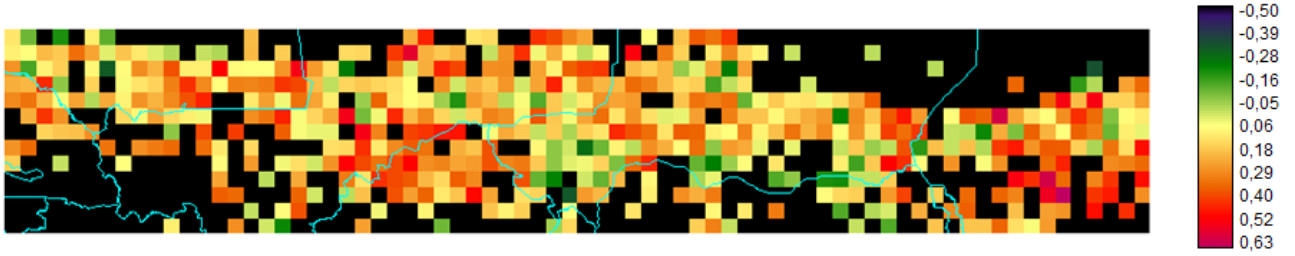


Figure 7. Corrélation (Kendall) des résidus par rapport au temps (période 1982-2002). Les points noirs ne présentaient pas une relation significative entre NDVI et précipitation et en conséquence les résidus n'ont pas été calculés.

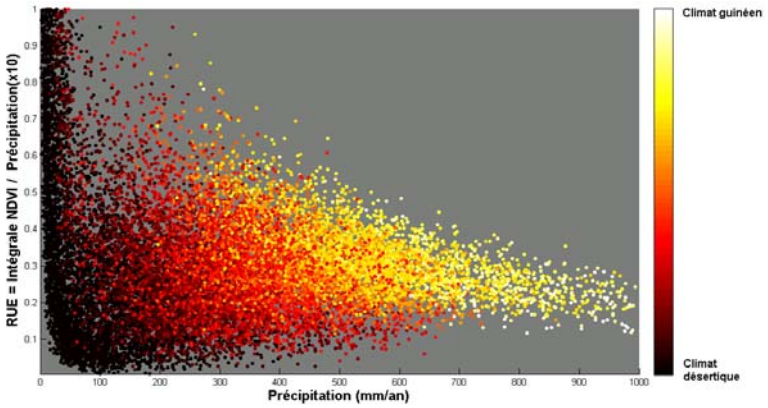


Figure 8. Rapport entre le RUE et la précipitation.
Les couleurs montrent les régions plus au mois humides auxquelles appartiennent les points.

5. CONCLUSION

Dans cet article on a étudié à une échelle régionale l'évolution de la couverture végétale au Sahel pour la période 1982-2002. L'étude a été centrée sur les possibilités de faire ce suivi à partir des données NDVI et précipitation et nous avons essayé de comprendre les controverses autour du sujet de l'identification de tendances pluri-annuelles (récupération ou dégradation du couvert végétal). La méthode des résidus de la corrélation NDVI-pluie s'avère être une bonne méthode pour faire ce suivi, permettant de démêler la haute variabilité de la précipitation de la réponse de la végétation. La méthode présente pourtant quelques inconvénients. Certaines dégradations provoquent un changement graduel des espèces présentes par d'autres espèces, souvent indésirables et typiques d'un écosystème plus dégradé. Ce changement ne peut pas être détecté par cette méthode. En outre, il n'est pas possible de savoir si la dégradation ou récupération de la région ont été causées par la variabilité climatique ou par l'action anthropique, car on n'a pas considéré ici les effets de mémoire des années précédentes sur la végétation actuelle (Wiegand *et al*., 2004 ; Wessels *et al*., 2007). Des études complémentaires restent à entreprendre concernant les effets mémoire, la caractérisation des pentes des droites de régression, et le recours aux données MODIS et LANDSAT. Les valeurs singulières liées aux années sèches (comme 1984) peuvent parfois fausser les corrélations, surtout dans la limite nord du Sahel, il faut donc traiter ces données avec précaution. Certains auteurs indiquent que les résultats de la méthode des résidus sont très bien corrélés avec l'évolution du NDVI, cependant des différences importantes ont été observées.

Il y a eu des dégradations ponctuelles au Sahel africain pendant la période 1982-2002 (qui restent apparemment liées à l'activité humaine) , mais il y a une tendance générale à la récupération comme résultat de l'augmentation de pluies à partir des années 1990. Quelques études à une résolution plus fine (LANDSAT) ont été effectuées sur les régions où des changements de la couverture végétale ont été détectés par la méthode des résidus. Les premiers résultats ont corroboré les tendances obtenues avec la méthode des résidus.

L'étude des résidus en choisissant le NDVI maximum comme indice de productivité et différentes périodes d'accumulation (avec décalage variable) des précipitations, prenant ainsi en compte l'hétérogénéité des conditions environnementales et climatiques, apparaît comme une approche efficace pour le suivi de la dégradation en Afrique sahélienne à une échelle régionale.

La haute corrélation négative entre RUE et précipitation est un problème majeur pour l'utilisation du RUE pour un suivi de l' amélioration/dégradation du couvert végétal. Les variations interannuelles de RUE peuvent être très fortes et très liées à l'eau effectivement utilisée par la plante. L'utilisation d'autres indices tels que le « Water Use Efficiency » WUE devraient être envisagée.

L'utilisation des satellites à haute résolution temporelle comme Météosat Seconde Génération (MSG) pour le suivi régional de paramètres tels que le NDVI et la précipitation pourrait améliorer ce genre d'analyse dans le futur. L'obtention de données pluviométriques de qualité avec une résolution spatiale améliorée reste indispensable à l'amélioration de la précision des résultats.

Remerciements

Ce travail a été financé partiellement par la bourse de doctorat “Caja Madrid ” dont José Luis San Emeterio a été bénéficiaire.

Références :

Anyamba, A., Tucker,C. J. (2005) Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981–2003”. Journal of Arid Environments 63, 596–614.

Ait-Bachir, S. (2006) Méthodologie d’identification des stades de dégradation des grands groupements végétaux fonctionnels. Thèse Univ. Jean Monnet, Saint-Etienne., 327 pp.

Brunsell, N. A. (2006) Characterization of land-surface precipitation feedback regimes with remote sensing. Remote Sensing of Environment 100, 200-211.

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, 199–216.

Du Plessis, W. P. (1999) Linear regression relationships between NDVI, vegetation and rainfall in Etosha National Park, Namibia. J. of Arid Environments, 42, 235-260.

Jönsson, P., Eklundh, L. (2002) Seasonality extraction and noise removal by function fitting to time-series of satellite sensor data”. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40, 1824-1832.

Jönsson, P., Eklundh, L. (2004) TIMESAT – a program for analysing time-series of satellite sensor data”. Computers and Geosciences, 30, 833-845.

Evans, J., Geerken, R. (2004) Discriminate between climate and human-induced dryland degradation”. Journal Arid of Environment 57, 535-554.

Foody, G. M. (2003) Geographical weighting as a further refinement to regression modelling: an example focused on the NDVI-rainfall relationship. Remote Sensing of Environment 88, 283-293.

Helldén, U.,Tottrup, C. (2008) Regional desertification: a global synthesis”. Global and Planetary Change 64, 169-176.

Hermann, S., Anyamba, A.,Tucker, C. J. (2005) Recents trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. Global Environmental change 15, 394-404.

Hermann, S., Hutchinson, C. F. (2005) The changing contexts of the desertification debate. Journal of Arid Environments 63, 538–555.

Hountondji,Y.-C., Sokpon, N., Ozer, P. (2006) Analysis of the vegetation trends using low resolution remote sensing data in Burkina Faso (1982–1999) for the monitoring of desertification”. International Journal of Remote Sensing 27, 871-884.

Le Houérou, H.-N. (1984) Rain-use efficiency: a unifying concept in arid land ecology. Journal of Arid Environments, 7, 1-35.

Le Houérou, H.-N., Bingham, R. L. , Skerbek,W. (1988) Relationship between the variability of primary production and the variability of annual precipitation in world arid lands”. Journal of Arid Environments, 15, 1-18.

Mitchell,T.-D., Jones, P.-J., (2005) An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. International Journal of Climatogy. 25, 693–712.

Nicholson, S. (2005) On the question of the recovery of the rains in the western Sahel. Journal of Arid Environments, 63, 615-641.

Nicholson, S. E., Davenport M. L., Malo A. R. (1990) A comparison of the vegetation response to rainfall in the Sahel and East Africa, using Normalized Difference Vegetation Index from NOAA AVHRR”. Climatic Change 17, 209-241.

Olsson, L., Eklundh, L., Ardo, J. (2005) A recent greening of the Sahel-trends, patterns and potential causes. Journal of Arid Environments 63, 556–566.

Prince, S. D., Brown, E., Kravitz ,L. L. (1998) Evidences from rain uses efficiencies does not indicate extensive Sahelian desertification”. Global Change Biology, 4, 359-374. 1998.

Reij, C., Tappan, G., Belemvire, A. (2005) Changing land management practices and vegetation on the Central Plateau of Burkina Faso (1968-2002) . Journal of Arid Environments 63, 642–659.

Schmidt,H., Karnieli, A.(2000) Remote sensing of the seasonal variability of vegetation in a semi-arid environment. Journal of Arid Environments 45, 43-59.

Symeonakis, E., Drake, N. (2004) Monitoring desertification and land degradation over sub-saharan Africa. International Journal of Remote Sensing 25, 573-592.

Tucker, C. J., Pinzon, J. E., Brown, M. E., Slayback, D., Pak, E.W. R., Vermote, E., El Saleous, N. (2005) An extended AVHRR 8-km NDVI data set compatible with MODIS and SPOT VEGETATION NDVI data. International Journal of Remoting Sensing 26, 4485-4498.

Wessels, K. J.,Prince, S. D., Malherbe, J., Small, J., Frost, P. E.,Vanzyl, D. (2007) Can human-induced land degradation be distinguished from rainfall variability? A case study in South Africa”. Journal of Arid Environment, 67, 271-297.

Wiegand,T., Snyman, H.A., Kellner, K., Paruelo, J.M. (2004) Do grasslands have a memory: modeling phytomass production of a semiarid South African Grassland”. Ecosystems 7, 243-258.