

Mise en évidence de la résilience de la végétation sahélienne par télédétection basse résolution au Niger à la suite d'épisodes de sécheresse

Yvon-Carmen Hountondji

Université de Liège - Université de Parakou

Jacques Nicolas

Université de Liège

Nestor Sokpon

Université de Parakou

Pierre Ozer

Université de Liège

RÉSUMÉ

Dans l'optique d'identifier les endroits potentiellement affectés par la désertification au cours des deux dernières décennies, 109 stations réparties dans trois zones bioclimatiques du Niger ont été étudiées. L'analyse conjointe des séries chronologiques de précipitations et d'images satellites AVHRR de NOAA, transformées en indice de végétation normalisé (NDVI) a permis d'appréhender la dynamique du couvert végétal au sein des biomes considérés entre 1982 et 1999. L'évaluation qualitative de la dynamique à long terme du couvert végétal a été réalisée grâce à l'analyse de tendance des valeurs annuelles du rapport du NDVI intégré (*i*NDVI: juin – octobre) par rapport aux précipitations (RR) pendant la période de végétation active (mai – octobre), pour chacun des points étudiés. Sur la période analysée, il ressort que 82,5% des résultats obtenus pour les précipitations contre 78,9% des valeurs du *i*NDVI montrent une tendance positive allant de modérée à très forte pour l'ensemble des pixels. Par contre, la combinaison des deux variables à travers le rapport *i*NDVI/RR montre un déclin généralisé de l'efficacité de l'utilisation de l'eau par la végétation avec une tendance hautement significative (niveau $p < 10^{-6}$) sur la période analysée (1981-1999), lorsque les stations sont regroupées par zones bioclimatiques. Les tendances négatives traduisent une diminution progressive de la productivité végétale qui se reflète dans la baisse du ratio *i*NDVI/RR. Cette situation suggère une dégradation environnementale continue et met en lumière que les processus de désertification se sont probablement perpétués au cours des deux dernières décennies sur plus de la moitié de la frange sahélienne du territoire nigérien.

MOTS-CLÉS: *i*NDVI, précipitations, désertification, Niger, Sahel

ABSTRACT

EVIDENCE OF SAHELIAN VEGETATION RESILIENCE IN NIGER AFTER DROUGHT PERIODS BY USING LOW RESOLUTION SATELLITE DATA

In order to identify areas where desertification may have occurred over the last two decades, 109 stations located in three bioclimatic zones of Niger are analyzed. Time series of remote sensing data are well suited to this task. Here, we use time series of NOAA AVHRR normalized difference vegetation index (NDVI) data and rainfall data. In this study, trend analysis is used to identify areas within the biomes from 1981 to 1999 in Niger with apparent land degradation in semi-arid areas. It appears that most of Niger (82,5%) recorded increasing rainfall while only 78,9 % experienced increasing in integrated vegetation index (*i*NDVI). However, the combination of the two variables through the ratio *i*NDVI/RR shows a widespread reduction of the rain-use efficiency with highly significant trend for the stations grouped by bioclimatic area ($p < 10^{-6}$) during the studied period (1981-1999). These negative trends suggest a progressive diminution of the vegetation productivity as highlighted by the lowering of the *i*NDVI/RR ratio. This situation suggested a consistently environmental degradation and that desertification processes continued during the last two decades over most of the Sahelian belt of Niger.

KEY WORDS: *i*NDVI, rainfall, desertification, Niger, Sahel

INTRODUCTION

Dépends le milieu des années 1970, la désertification a bénéficié d'un intérêt considérable tant de la part des scientifiques, que des politiques et du public en général. Elle est actuellement reconnue comme étant une problématique environnementale majeure pour le XXI^e siècle (World Bank, 2002). Cependant, le terme désertification est souvent galvaudé et malheureusement confondu avec la sécheresse (Thomas, 1993). Durant ces dernières décennies, la lutte contre la désertification n'a pas atteint son objectif et est considérée par un grand nombre d'observateurs comme étant un réel échec par manque, entre autres, d'indicateurs pertinents pour en assurer le suivi et d'une définition universelle de la problématique (Hellden, 1991; Glenn *et al.*, 1998). Dès lors, plusieurs auteurs ont tenté de déterminer des indicateurs appropriés, simples et accessibles à tous, pour le suivi de l'état de la désertification (Rapp, 1974; Mabutt, 1986; Berger, 1996; Mouat *et al.*, 1997; Ozer, 2000; Prince, 2002; Symeonakis et Drake, 2004).

Un indicateur environnemental peut être

défini comme des mesures de magnitude, fréquence, taux et tendance de processus environnemental qui peut être observé à la surface de la Terre, et qui est sujet à des variations significatives pour déterminer et comprendre les changements environnementaux à l'échelle humaine. L'indicateur environnemental doit permettre d'identifier le plus rapidement possible les tendances en cours (Elliott, 1996) et doit être facilement compréhensible par les autorités politiques compétentes ainsi que par les bailleurs de fonds pour que des actions puissent être prises rapidement pour ralentir ou stopper les processus en cours (Neimanis et Kerr, 1996).

Dans cet article, nous proposons d'utiliser un indicateur qui associe les indices de végétation dérivés du capteur à basse-résolution AVHRR de NOAA et les précipitations mesurées au sol en région sahélienne sur la plus longue période jamais utilisée, à savoir 1981-1999, dans le but d'identifier les zones connaissant une dégradation potentielle.

PROBLÉMATIQUE SAHÉLIENNE

Depuis la fin des années 1960, la région sahélienne est gravement affectée par le déficit pluviométrique le plus important, tant dans son intensité que dans sa durée, jamais enregistré au cours du XX^e siècle (Hulme, 1996; Morel, 1998; Dai *et al.*, 1998). Le paroxysme de cette sécheresse a été atteint durant la première moitié des années 1980 (Nicholson, 1985) et a provoqué des famines de grande envergure, qui ont mobilisé la solidarité internationale. A cette détérioration climatique s'est ajoutée une augmentation drastique de la pression anthropique sur l'environnement. L'explosion démographique de ces dernières décennies entraîne tout un cortège d'impacts sur l'environnement, dont les plus significatifs sont les pratiques agricoles non appropriées, la sur-

exploitation des sols et des ressources hydriques, le surpâturage, le piétinement, les migrations des populations vers le sud ou vers les noyaux urbains et la sédentarisatration massive des populations nomades (Thomas et Middleton, 1994; Ozer, 2000). Il en résulte une dégradation du milieu qui se traduit dans le paysage par la diminution du rendement des cultures (Gommès, 1998), par la remise en activité des dunes autrefois fixées par la végétation (Ozer, 2002) et par un déboisement excessif (Ozer, 2004). Ces dernières années, un retour à des conditions pluviométriques moins déficitaires semble s'être amorcé dans certaines régions d'Afrique de l'Ouest (Hulme, 2001; Sene et Ozer, 2002; L'Hôte *et al.*, 2002; Ozer *et al.*, 2003).

UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION DANS L'ÉTUDE DE LA DÉSERTIFICATION

IMAGES SATELLITAIRES À HAUTE RÉSOLUTION

Les analyses multi-temporelles, réalisées à partir d'images satellitaires à haute résolution (1 à 30 mètres de résolution spatiale), ont permis de mettre en évidence les processus de dégradation environnementale dans les zones arides, semi-arides et sub-humides sèches au Sahel. Dans ces études, des photographies aériennes des années cinquante et soixante-dix sont le plus souvent comparées avec des images TM de LANDSAT ou HRV de SPOT des deux dernières décennies. A noter également l'utilisation des images ASTER et des images à très haute résolution comme IKONOS. Ces études sont le plus fréquemment supportées par des missions de réalité de terrain et complétées par des enquêtes auprès des populations locales. Les résultats qui en découlent sont généralement similaires: d'une part, une diminution importante des zones boisées et de la végétation en général et, d'autre part, une augmentation remarquable des sols dégra-

dés qui se marque souvent par une remise en mouvement du sol par la déflation éolienne (Chamard et Courel, 1979; Kuberow, 1990; Karimoune, 1994; Kuberow, 1994; Lindqvist et Tengberg, 1994; Pare et Tallet, 1999; Valentin et d'Herbes 1999; Gonzalez, 2001; Mainguet *et al.*, 2001; Cuny et Sorg, 2003). Il n'en demeure pas moins que les appréciations du phénomène varient fortement d'une zone d'étude à l'autre. Ainsi, Karimoune (1994) présente de manière précise la désertification comme un processus irréversible alors que les travaux de Lindqvist et Tengberg (1994) suivis de Rasmussen et son équipe (2001) suggèrent une certaine résilience de la végétation et vont donc à l'encontre du concept d'irréversibilité de la désertification.

L'avantage de ces études, reposant sur l'examen diachronique de missions aériennes et d'images satellitaires à haute résolution, réside dans la période d'analyse pouvant couvrir près d'un demi-siècle d'informations. Par contre, les faiblesses de ces analyses sont, d'une part, le coût

élevé pour l'acquisition des données tant aériennes que satellitaires ainsi que pour la main d'oeuvre et, d'autre part, le caractère local de l'étude.

IMAGES SATELLITAIRES À BASSE RÉSOLUTION

Les images satellitaires à basse résolution (1 km ou plus) fournies par les capteurs AVHRR de NOAA ou VEGETATION de SPOT permettent d'effectuer un suivi régulier à très faible coût des ressources renouvelables. La perte de précision due à la faible résolution spatiale est compensée par un large champ d'observation et par une excellente résolution temporelle. Une répétitivité journalière est en effet essentielle pour un suivi régulier des ressources, principalement végétales. Les plus longues séries ne débutent qu'en 1981, ce qui n'a permis le plus souvent l'analyse de diverses problématiques environnementales que sur une décennie. Diverses études se sont basées sur l'exploitation de l'imagerie satellitaire à basse résolution pour quantifier les processus de désertification. Les indicateurs les plus fréquemment utilisés sont le suivi simple de l'évolution de la végétation au moyen de l'indice de végétation normalisé (NDVI) ou de la combinaison de cet indice avec les précipitations sur des périodes de temps qui varient selon les auteurs (Nicholson *et al.*, 1998; Prince *et al.*, 1998; Foody, 2003; Symeonakis et Drake, 2004).

INDICE DE VÉGÉTATION NORMALISÉ (NDVI)

Mis au point par Rousse *et al.* (1973), le NDVI est élaboré à partir de la différence entre la réflectance de la végétation fournie par le capteur AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) du satellite NOAA dans le proche infrarouge (canal 2: 0,73-1,1 µm) et de celle obtenue dans le rouge (canal 1: 0,55-0,68 µm), divisée par la somme de ces deux mêmes réflectances. Le résultat d'un NDVI prend la forme d'une nouvelle image, dont les valeurs théoriques sont comprises entre -1 à +1. Mais en pra-

tique, les valeurs des images produites par le capteur AVHRR vont des valeurs négatives (eau) à 0,6 qui correspond à une végétation dense en passant par la valeur zéro (sol nu). A cause des variations spectrales des sols, la végétation peut être systématiquement distinguée d'un sol nu et une comparaison entre zones peut être faite à partir des valeurs 0,05 à 0,06. Pour le traitement informatique, les valeurs NDVI originales sont rééchelonnées et converties en valeurs digitales allant de 0 à 255, intervalles appelés «intervalle byte» avec 256 valeurs possibles correspondant à 8 bits. C'est l'analyse de la palette de nuances s'étendant entre ces valeurs extrêmes (très peu fréquentes) qui va renseigner l'observateur sur la densité de couvert et la quantité de biomasse verte. Cet indice est très utilisé en raison de la facilité de sa mise en oeuvre et surtout de sa corrélation avec la densité du couvert végétal, la capacité des végétaux à absorber la lumière solaire et à la convertir en biomasse.

En région sahélienne, la dynamique de la végétation est fortement liée à l'évolution pluviométrique (Nicholson *et al.*, 1998; Milich et Weiss, 2000a, 2000b). Au Mali et au Niger, les études de Malo et Nicholson (1990) suggèrent que le NDVI mensuel est directement fonction des précipitations mensuelles. Dans la même région, Justice *et al.* (1991) ont analysé les relations existant entre le NDVI décadaire et les précipitations décadiques estimées à partir de la durée des nuages à sommet froid (données METEOSAT). Les auteurs constatent une forte relation entre les deux paramètres tout en soulignant que le temps de réponse de la végétation aux précipitations est de une à deux décades. Des observations similaires ont été faites au Sahel et en Afrique de l'Est (Nicholson *et al.*, 1990; Davenport et Nicholson, 1993). Cette relation étroite a d'ailleurs permis la modélisation du NDVI en fonction des précipitations dans le sud du Niger et le nord du Nigeria (Hess *et al.*, 1996). Dès lors le NDVI est reconnu comme étant un indicateur fiable de l'état de la végétation (Grist *et al.*, 1997; Foody, 2003; Symeonakis et Drake, 2004).

OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'objet de cette étude est donc d'évaluer si l'état de la végétation présente également une amélioration consécutive à des conditions pluviométriques plus favorables (phénomène de résilience écologique, Holling, 1973), comme le suggèrent certaines études (Jacobberger-Jellison, 1994; Prince *et al.*, 1998; Nicholson *et al.*, 1998; Tucker et Nicholson, 1999; Rasmussen *et al.*, 2001; Pearce, 2002; Eklundh et Olsson, 2003), ou si, au contraire, la longue altération environnementale de ces dernières décennies a une bonne dose d'irréversibilité, du moins à l'échelle de plusieurs années voire même de quelques vies humaines, comme le soutient un autre courant d'idée (Mainguet, 1991; Wickens, 1997; Chamard et Courel, 1999; Ozer, 2000).

Cette étude est réalisée sur le Niger. Ce pays reflète les conditions environnementales et socio-économiques caractéristiques des nations sahéliennes. Ainsi, le Niger est le deuxième pays le plus pauvre de la planète avec un indice de développement humain extrêmement bas (UNDP, 2003). La population humaine y augmente de manière exponentielle (+3,2% par an), et est le plus souvent totalement dépendante de son environnement direct (FAO, 2004). Le couvert forestier se contracte à une vitesse vertigineuse (-3,7% par an) (FAO, 2001) tandis que le rendement des cultures est constamment à la baisse depuis le début des années soixante (FAO, 2004).

DONNÉES ET MÉTHODE

DONNÉES DE PRÉCIPITATIONS

Au Niger, les précipitations se concentrent de mai à octobre, avec 80 à 98% des précipitations annuelles de juin à octobre, et sont caractérisées par une très forte variabilité interannuelle (Ozer, 2000). Les données journalières de précipitations de 1981 à 1999 ont été fournies par la Direction de la Météorologie Nationale du Niger. De tout le réseau, les 109 stations ne présentant aucune lacune et dont la pluviométrie moyenne annuelle (calculée sur la période 1981-1999) est supérieure à 100 mm ont été automatiquement sélectionnées. Les différentes stations retenues ont été regroupées en trois zones bioclimatiques distinctes, à savoir:

- 100-300 mm: Sahel septentrional ou Sahel pastoral (Z1). L'isohyète de 100 mm représente la bordure du climat désertique correspondant à la limite nord du cram-cram (*Cenchrus biflorus*) (Quézel, 1965) ou à l'extension méridionale du hag (*Cornulaca monacantha*) (Capot-Rey, 1953) et des salsolacées, espèces typiquement sah-

riennes (Le Houerou, 1990);

- 300-500 mm: Sahel central ou Sahel à culture sous pluie (Z2). L'isohyète de 300 mm représente la limite nord de l'extension de la région broussailleuse à graminées courtes et à acacia (Andrews 1949) ainsi que la limite septentrionale de la culture du petit mil (*Pennisetum typhoides*) (Verheyen, 1990).
- 500-700 mm: Sahel méridional (Z3). L'isohyète de 500 mm correspond approximativement à la limite septentrionale des cultures non-irriguées (Gourou, 1970). Au sud, l'isohyète de 700 mm souligne la limite septentrionale du climat nord-soudanais (Richard-Molard, 1949).

Le choix de ne pas étendre la zone d'analyse à la zone désertique (moins de 100 mm par an) se justifie par le fait que les données obtenues au niveau des rares stations qui s'y trouvent sont lacunaires et donc non fiables. Par ailleurs, le nombre très limité de postes pluviométriques fonctionnels, ne saurait être représentatif de cette zone désertique qui couvre environ 67% du territoire nigérien. En définiti-

ve, sur les 109 stations étudiées, 32 sont localisées dans le Sahel septentrional, 58 dans la zone centrale et 19 dans le Sahel méridional (Figure 1).

DONNÉES DE NDVI

Les données de NDVI utilisées proviennent du capteur AVHRR de NOAA Pathfinder couvrant le globe de juillet 1981 jusqu'en décembre 2000 au pas de temps mensuel (Clarks Labs, 2001). La série d'images est complète à l'exception d'une période de quatre mois s'étendant de septembre à décembre 1994. Ces images sont géoréférencées et présentées en projection Hammer – Aitoff. La fenêtre de départ reprend tout le territoire nigérien situé en Afrique de l'Ouest. Le pixel en format 8 bits a une taille approximative de 7,6 km X 7,6 km à l'équateur ou 57,7 km². Les pixels sont re-échantillonnes à une résolution de 10 km. La synthèse mensuelle est obtenue par la procédure classique de «Maximum Composite

Value: MCV» (Holben, 1986). L'utilisation des images MCV présente l'avantage de réduire les effets d'extrême variabilité inhérente au NDVI dont la cause se situe dans les conditions atmosphériques lors de la prise de l'image, la position du soleil ou alors l'angle d'orientation du capteur. Le niveau de correction des images Pathfinder étant suffisant, aucune autre correction n'était nécessaire avant leur exploitation (NASA, 2000). La fonction de conversion qui permet de passer du code numérique (CN) à la valeur de NDVI originale pour les images fournies par NOAA - ARTEMIS est:

$$\text{NDVI} = 0.0039069 * \text{CN} - 0.320313$$

L'extraction des valeurs digitales de NDVI a été rendue possible grâce au logiciel WINSDIP version 5.1. (FAO /GIEWS, 2000).

Les séries d'indices de végétation normalisés sont extraites sur des pixels de 10 km X 10km centrés sur les stations météo-

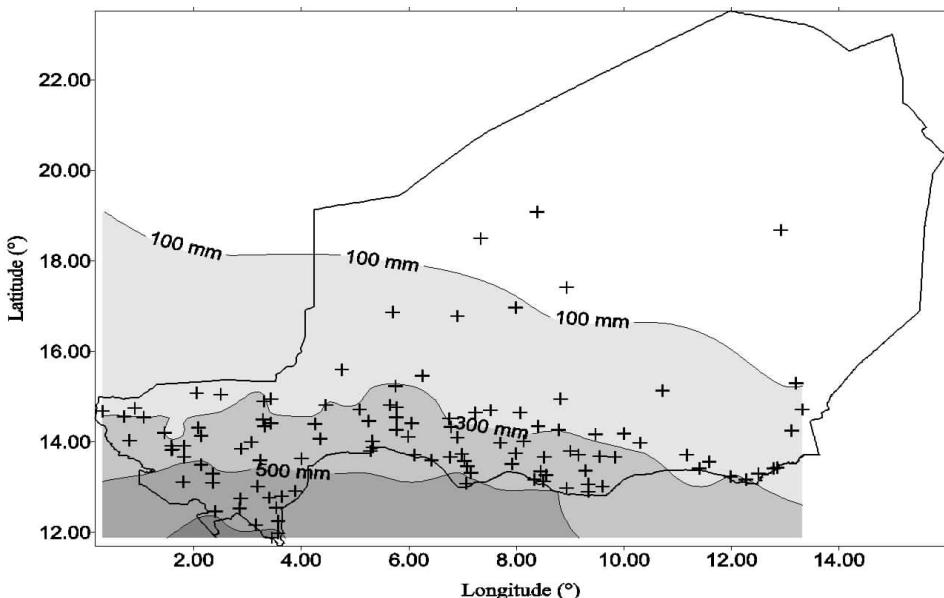


Figure 1. Distribution spatiale des stations étudiées par zone bioclimatique au Niger. Les isohyètes ont été obtenues par interpolation (krigeage) des moyennes annuelles de précipitations sur la période allant de 1980 à 2000.

rologiques ayant fourni les données pluviométriques. L'analyse se limite à la période de 1981-1999, car il a été démontré que les données satellitaires disponibles pour l'année 2000 sont biaisées à la suite d'un problème enregistré dans l'orbite de NOAA-14 (Eklundh et Olsson, 2003).

MÉTHODES

Dans la présente étude, l'indice de végétation intégré (*iNDVI*) pendant la période végétative (juin-octobre) sera comparé à la pluviométrie totale (RR) enregistrée de mai à octobre (Nicholson *et al.*, 1998). En effet, la valeur maximale de l'indice de végétation est généralement observée entre la troisième décennie d'août et la deuxième décennie de septembre (Hess *et al.*, 1996). Etant donné que le temps de réponse du développement de la végétation est approximativement de 10 à 20 jours (Justice *et al.*, 1991; Davenport et Nicholson, 1993), la décision de bloquer le total pluviométrique et l'indice de végétation intégré, respectivement de mai à octobre puis de juin à octobre, nous semble cohérente. L'évolution du *iNDVI* se fait au niveau de chaque pixel incluant les stations pluviométriques qui serviront à l'analyse de tendance. Ce choix de ne pas étendre l'unité spatiale d'analyse à plusieurs pixels est motivé par le fait que, de par leur caractère local orageux, les pluies sahariennes et soudanaises présentent une très forte hétérogénéité spatiale (Sivakumar et Hatfield, 1990).

Evolution des précipitations et du iNDVI

L'analyse des tendances linéaires, tant des précipitations que du *iNDVI* sur le long terme (1981-1999), a été réalisée au niveau des 109 points d'analyse. Pour chaque station, les deux tendances ont été estimées par régression linéaire entre les précipitations (respectivement le *iNDVI*) et le temps (en années). Les pentes ainsi estimées ont été regroupées en quatre classes indiquant des tendances forte, modérée, à la hausse ou à la baisse. La limite des quatre classes considérées est définie à partir de la sta-

tistique *t* de Student utilisée pour tester l'hypothèse d'une pente égale à 0. Dès lors, la tendance est qualifiée de forte si la valeur *t* de la pente de la régression est significative, en l'occurrence si le seuil de signification *p* correspondant est inférieur à 0,1. Les tendances qui n'étaient pas statistiquement significatives ont été qualifiées de modérées.

En outre, les tendances au niveau du NDVI résultent de l'interaction de divers facteurs, à savoir certains artefacts sur les données satellitaires, des variations biophysiques et les influences anthropiques. Les artefacts sur les données satellitaires semblent extrêmement minimes durant la période analysée (Eklundh et Olsson, 2003). Dès lors, les variations de l'indice de végétation ne peuvent s'expliquer que par des variations pluviométriques ou des interventions humaines pouvant soit réduire la couverture végétale (dégradation) soit l'étendre, via la bonification des terres ou l'intensification agricole. La démarche adoptée devrait permettre d'identifier les zones connaissant une augmentation ou une dégradation, tant au niveau du régime pluviométrique que de l'indice de végétation (NDVI) sur les 19 années d'étude.

Rapport iNDVI/RR

Dans les régions sub-sahariennes, de nombreux travaux ont montré que l'efficacité de l'utilisation de l'eau par la végétation constitue un bon indicateur permettant de détecter le processus de désertification (Malo et Nicholson, 1990; Nicholson *et al.*, 1998; Prince *et al.*, 1998; Diouf et Lambin, 2001; Symeonakis et Drake, 2004; Tottrup et Rasmussen, 2004). Cet indicateur est obtenu à partir d'une combinaison de la production primaire nette dérivée des valeurs de NDVI fournies par l'imagerie satellitaire, avec les précipitations au sol. Dans l'optique d'analyser l'évolution interannuelle de l'importance de la couverture végétale en fonction des précipitations reçues au cours de la période de végétation (RR: mai à octobre), le rapport *iNDVI/RR* a été calculé par année pour l'ensemble des stations regroupées dans les trois zones

bioclimatiques retenues. L'expression de ce rapport est donnée par l'équation ci-après:

$$iNDVI / RR = \sum_{juin}^{octobre} NDVI / \sum_{mai}^{octobre} RR$$

Des régressions ont été établies par zone afin d'apprecier la significativité des tendances notées. Dans la suite de notre analyse, la tendance sera qualifiée de

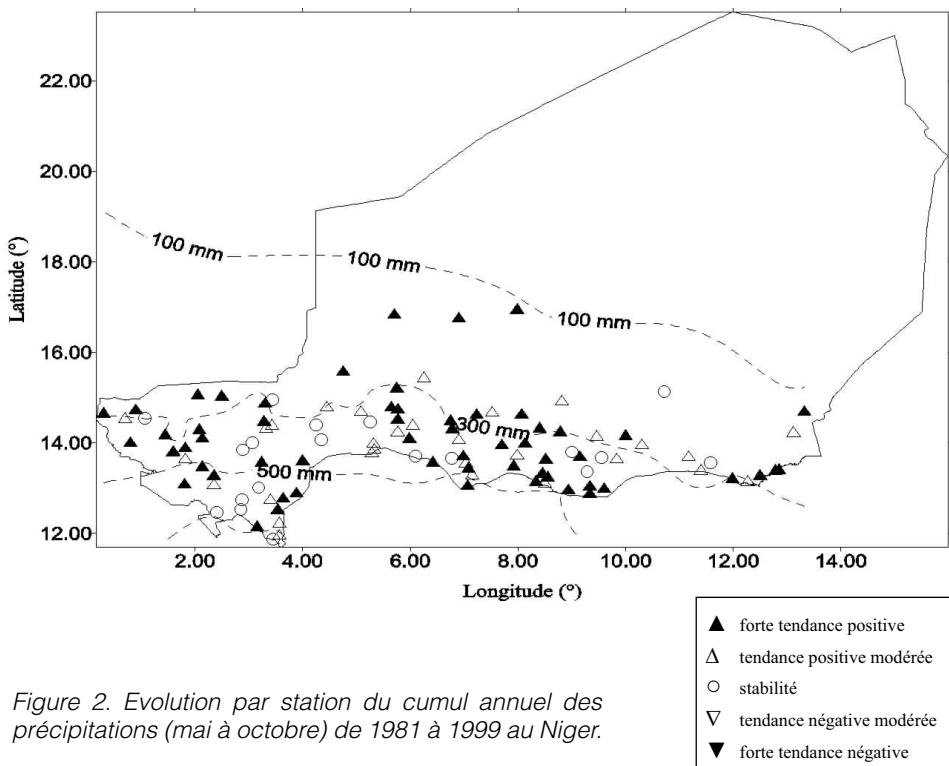
forte si la valeur t de Student, obtenue pour la pente de régression, est significative au seuil de 0,1. Pour les valeurs de t dont le seuil p est compris entre 0,1 et 0,5, la tendance est dite modérée, et pour toute valeur de t dont le seuil est supérieur à 0,5 la tendance sera qualifiée de stable. Enfin, en fonction du signe du coefficient directeur de la droite de régression des pentes, la tendance est positive (hausse) ou négative (baisse).

RÉSULTATS

EVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS

Les tendances observées par station pour les précipitations totales en période de végétation active (RR) au sein des 109 stations analysées sont présentées à la figure 2. Au total, 55% des stations analysées accusent une tendance forte à l'aug-

mentation des précipitations et 27,5% montrent une tendance modérée de l'amélioration pluviométrique (tableau 1). 19 stations accusent une stabilité des hauteurs de pluies. Précisons qu'aucune forte diminution des précipitations n'a été détectée sur la période analysée.



Typologie de la tendance	Zones bioclimatiques						Total (stations étudiées)			
	Zone 1 : Sahel septentrional		Zone 2 : Sahel central		Zone 3 : Sahel méridional					
	Nombre de stations	%	Nombre de stations	%	Nombre de stations	%				
Paramètre RR										
Forte tendance positive ($p<0,1$)	18	56,3	34	58,6	8	42,1	60	55		
Tendance positive modérée ($0,1<p<0,3$)	10	31,2	15	25,9	5	26,3	30	27,5		
Stable ($p<0,3$)	4	12,5	9	15,5	6	31,6	19	17,5		
Tendance négative modérée ($0,1<p<0,3$)	0	0	0	0	0	0	0	0		
Forte tendance négative ($p<0,1$)	0	0	0	0	0	0	0	0		
Total	32		58		19		109	100,0		
Paramètre iNDVI										
Forte tendance positive ($p<0,1$)	24	75	38	65,5	9	47,4	71	65,1		
Tendance positive modérée ($0,1<p<0,3$)	4	12,5	9	15,6	2	10,5	15	13,8		
Stable ($p<0,3$)	4	12,5	11	18,9	8	42,1	23	21,1		
Tendance négative modérée ($0,1<p<0,3$)	0	0	0	0	0	0	0	0		
Forte tendance négative ($p<0,1$)	0	0	0	0	0	0	0	0		
Total	32		58		19		109	100,0		
Paramètre iNDVI / RR										
Forte tendance positive ($p<0,1$)	0	0	0	0	0	0	0	0		
Tendance positive modérée ($0,1<p<0,3$)	0	0	0	0	0	0	0	0		
Stable ($p<0,3$)	15	46,8	25	43,1	10	52,6	50	45,9		
Tendance négative modérée ($0,1<p<0,3$)	13	40,7	17	29,3	3	15,8	33	30,3		
Forte tendance négative ($p<0,1$)	4	12,5	16	27,6	6	31,6	26	23,9		
Total	32		58		19		109	100,0		

Tableau 1. Classification des pixels en fonction de la tendance des paramètres RR, iNDVI, et iNDVI / RR dans les trois zones bioclimatiques étudiées.

EVOLUTION DE L'INDICE DE VÉGÉTATION INTÉGRÉ (iNDVI)

Les différentes tendances enregistrées au niveau du iNDVI pour la période 1981-1999 sont présentées à la figure 3. Il en résulte que 65,1% des points étudiés montrent une forte tendance positive et 13,8% des pixels présentent une tendance modérée à la hausse. Par contre, 21% des points enregistrent une stabilité du iNDVI.

La répartition géographique des points concernés par les fortes tendances positives est bien spécifique. En effet, une concentration maximale est observée au nord et décroît sensiblement vers le sud: 75% des stations du Sahel septentrional, 65,5% dans le Sahel central et 47,4% dans le Sahel méridional. Globalement, il ressort néanmoins que les stations montrant une tendance stable du iNDVI sont cantonnées à la zone méridionale (42% contre 12 et 18% respectivement pour le

Sahel septentrional et central). Cependant, aucune agrégation spatiale des stations analysées n'a été observée. Ceci met en évidence le fait que, dans un contexte de pression anthropique, la diminution de la couverture végétale obéit plus à un mitage progressif de la couverture végétale qu'à une avancée régulière de la dégradation environnementale. En définitive, 82,5% des résultats obtenus pour les précipitations montrent une tendance à la hausse alors que seulement 78,9% des valeurs du iNDVI sont en augmentation. Seule une localité témoigne d'une baisse non significative des pluies alors qu'une baisse non significative ($p>0,3$) de l'indice de végétation s'observe au niveau 4 stations sur les 109 étudiées.

Cette situation augure d'une certaine reconstitution de la couverture végétale dans les zones ayant subi les effets dramatiques de la détérioration climatique ayant sévit dans la région au cours de la

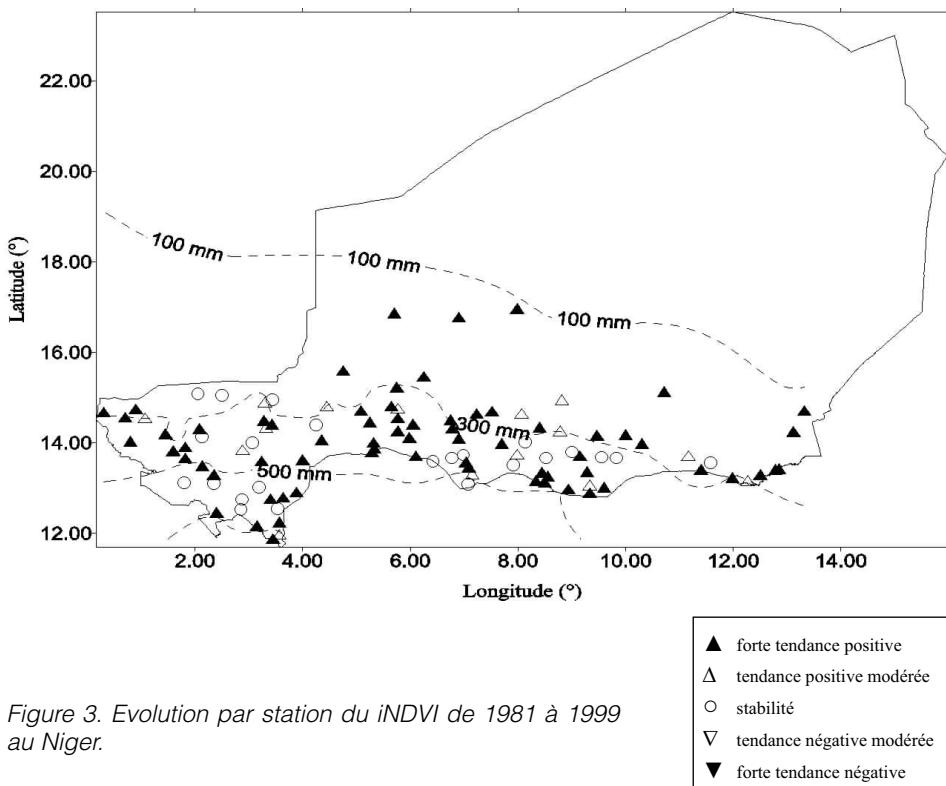


Figure 3. Evolution par station du iNDVI de 1981 à 1999 au Niger.

décennie 1980. La réduction de la couverture végétale ne saurait à elle seule indiquer nécessairement une extension progressive de la désertification, car les fluctuations interannuelles observées dans la couverture végétale dépendent également d'autres facteurs naturels, tels que la phénologie, les variations des précipitations, ou les types de cultures qui ne sont pas liées au processus de désertification. Le recours à un indicateur pouvant harmonieusement combiner la productivité de la végétation avec les quantités des pluies reçues selon les zones bioclimatiques permettrait de lever le doute sur l'état du milieu au cours de la période d'étude.

L'EFFICACITÉ D'UTILISATION DES PRÉCIPITATIONS: RAPPORT iNDVI/RR

Les différentes tendances enregistrées au niveau du rapport iNDVI/RR pour la période de 1981-1999 sont présentées à la figure 4. L'évolution des rapports iNDVI/RR pour les trois zones en fonction du temps est présentée à la figure 5. Sur ce graphique, les barres d'erreur permettent d'apprécier, pour chacune des années analysées, la dispersion des observations autour de la valeur moyenne des stations: elles correspondent à un intervalle de confiance de 95% autour de la moyenne. Les régressions linéaires établies avec l'ensemble des points pour chacune des zones montrent une pente négative hau-

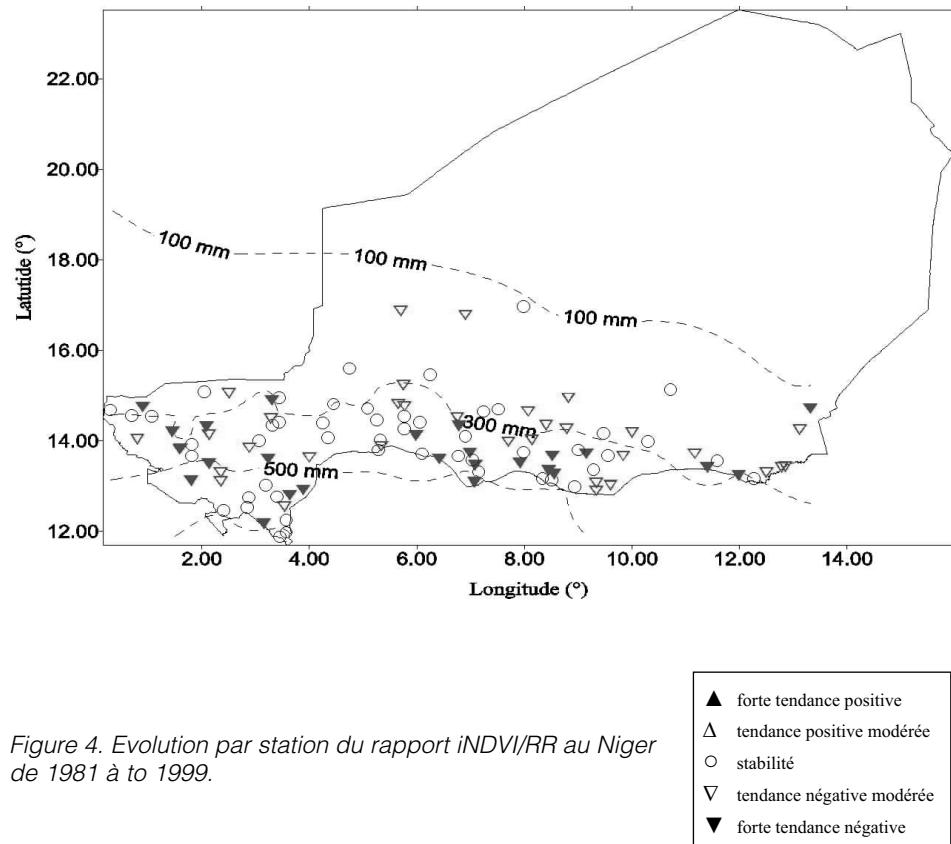


Figure 4. Evolution par station du rapport iNDVI/RR au Niger de 1981 à 1999.

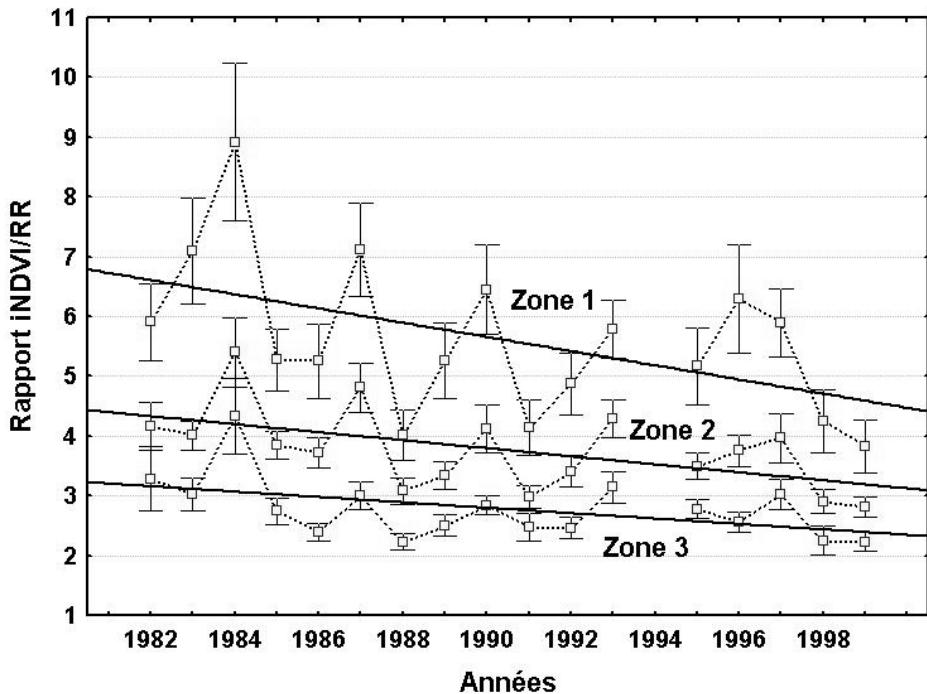


Figure 5. Evolution du rapport iNDVI/RR dans les trois zones bioclimatiques étudiées au Niger de 1981 à 1999.

tement significative ($p<10^{-6}$) pour la statistique t de Student dans l'ensemble des trois zones bioclimatiques sur la période 1981-1999. Cette situation découle du fait que l'année 1984 a été particulièrement sèche sur l'ensemble du Sahel, ce qui engendre des valeurs très élevées du rapport iNDVI/RR et donc une augmentation de la significativité de la pente des régressions.

Par ailleurs, lorsqu'on considère uniquement la période 1985 - 1999, les résultats montrent toujours une décroissance du rapport iNDVI/RR dans l'ensemble des trois zones bioclimatiques, avec tendance non significative pour le Sahel septentrional ($p=0,52$), hautement significative pour le Sahel central ($p=0,00009$) et significative dans le Sahel méridional ($p=0,041$). Une analyse détaillée des tendances pour chacune des stations regroupées par zone bioclimatique est synthétisée au tableau 1.

Il en résulte que près d'une station sur deux montrent un déclin du rapport iNDVI/RR avec une tendance négative allant de modérée (30,2% des cas) à forte (23,9%) pour l'ensemble des 109 pixels analysés; 45,9% des pixels témoignent d'une certaine stabilité et aucune station ne montre une amélioration significative ($p<0,3$) de l'efficacité de l'utilisation des précipitations consécutive à la hausse des précipitations précédemment notée. Il importe de signaler que le déclin significatif du rapport iNDVI/RR est plus marqué dans le Sahel méridional (31,6% des pixels analysés) et dans le Sahel central (27,6%) que dans la zone sub-désertique (12,5% des points considérés). Il apparaît donc que la baisse du rapport iNDVI/RR laisse ainsi entrevoir une extension globale du phénomène de dégradation de la végétation, qui s'accentue notamment dans les zones de production agricole et de pâturage.

DISCUSSION

Au cours de la période 1981-1999, une reprise pluviométrique a été notée sur la quasi totalité des 109 stations couvrant le territoire nigérien au sud l'isohyète de 100 mm. Ces résultats corroborent les observations récentes sur les variations des précipitations au Sahel (Ozer *et al.*, 2003). Durant la même période, près de trois stations sur quatre ont enregistré une augmentation de la productivité végétale reflétée dans le cadre de cette étude par le iNDVI. Nos résultats confortent les études précédentes de Nicholson *et al.* (1998), qui suggèrent que la productivité des plantes augmente avec la hausse des précipitations et diminue avec la sécheresse.

Le rapport iNDVI/RR a été suggéré par divers auteurs (Nicholson *et al.*, 1998; Prince *et al.*, 1998; Symeonakis and Drake, 2004) comme étant l'indicateur de référence pour identifier des zones souffrant des processus de désertification. Nicholson *et al.* (1998) ainsi que Prince *et al.* (1998) ont ainsi indiqué, sur la base de l'analyse de respectivement douze et neuf années, que le Sahel ne présentait pas de dégradation environnementale extensive. Nos résultats portant sur 19 années vont à l'encontre des études précédentes et montrent une diminution hautement significative de la productivité végétale dans deux des trois zones bioclimatiques étudiées. Ainsi, la tendance observée sur la période après la sécheresse (1985-1999), montre une diminution notable du rapport iNDVI/RR dans les zones centrale et méridionale, alors que la végétation du Sahel septentrional semble connaître une résilience aux conditions plus humides de ces dernières années. Ces résultats sont en accord avec ceux de Rigina et Rasmussen (2003) qui observent, de 1986 à 1999 au Sénégal, une baisse des valeurs du ratio de l'indice de végétation

intégré et des précipitations, respectivement dans la zone pastorale et dans le nord du pays (25%) puis dans la région agricole au centre (53%) qui peut être assimilée au Niger à la zone sahélienne méridionale. Au Burkina Faso, l'utilisation de la même méthode montre qu'une baisse du ratio de l'indice de végétation intégré et des précipitations est observée dans près de 40% des stations (Hountondji *et al.*, 2006). De toutes ces études, il est intéressant de constater que la répartition géographique des points sujets à une probable dégradation de l'état de la végétation est assez disparate et pourrait être le signe de dégradation par mitage, fonction essentiellement de la présence plus ou moins importante de la population. Ceci conforte les informations de terrain rassemblées par Hiernaux et Turner (2002), qui présentent une situation très contrastée entre les zones sahéliennes septentrionale et méridionale. D'après ces auteurs, les risques de dégradation environnementale seraient modérés et principalement influencés par les fluctuations climatiques en zone pastorale, alors qu'ils seraient élevés et particulièrement sensibles aux pressions anthropiques dans le sud du Sahel. D'autres études menées dans la région de Maradi, zone centrale du Niger, montrent qu'il y a une baisse continue de la fertilité des sols à la suite de l'intensification agricole causée, entre autres, par la disparition des jachères naguère fréquentes (Mahaman, 2001). Il nous semble évident que ces pertes de fertilité des sols se traduisent par la diminution progressive de la productivité qui se reflète dans la baisse du rapport INDVI/RR. Il pourrait en aller de même pour la réduction des zones naturelles au profit des zones agricoles (Mortimore *et al.*, 2001).

CONCLUSION

Il apparaît que l'indicateur proposé (iNDVI/RR) permet de mettre en évidence les zones subissant une dégradation environnementale prononcée, et ce avec un très faible rapport coûts/bénéfices. Cette méthode d'investigation, basée sur l'analyse des tendances, nous semble plus adaptée pour une évaluation opérationnelle de l'état de l'environnement dans un pays sahélien comme le Niger. Il s'agit d'une approche simple et reproductible, facile à interpréter et moins sensible aux variations dans le temps. Au niveau national, cet indicateur pourrait donc être utilisé pour le suivi des processus de désertification et être présenté de manière optimale dans les Programmes d'action nationaux (PAN) de lutte contre la désertification. Les autorités nationales et internationales pourraient ainsi inciter les responsables départementaux et locaux à orienter des actions de lutte contre la désertification en divers points critiques identifiés grâce à ce type d'étude. Certes, un pas supplémentaire consisterait à spatialiser l'information pluviométrique (par krigeage

ou à l'aide de la pluviométrie estimée par METEOSAT) et de réaliser une étude globale au niveau de chaque pixel dans le but de couvrir le territoire national sans discontinuité. Cependant, cette étude montre son efficacité en couvrant plus de dix mille kilomètres carrés. Il est donc souhaitable que la méthode utilisée au cours de cette étude soit étendue à tous les pays du Sahel pour s'assurer de l'état de l'environnement dans cette région très sensible du continent africain au cours de deux dernières décennies.

REMERCIEMENTS

Nous remercions la Direction de la Météorologie Nationale du Niger pour nous avoir fourni les données de précipitations utilisées dans cette étude. Le premier auteur tient à remercier le Conseil Interuniversitaire de la Communauté française de Belgique (CIUF) pour la bourse d'étude qui lui a été accordée pour entreprendre une thèse en Sciences de l'Environnement, dans le cadre de laquelle cette recherche a été réalisée.

RÉFÉRENCES

- ANDREWS F.W. (1949), «The vegetation in the Soudan», in TOTHILL J.D. (ed.), *Agriculture in the Soudan*, Oxford University Press, London, pp. 32-61.
- BERGER A.R. (1996), «Introduction to geoindicator checklist», in BERGER A.R. & IAMS W.J. (eds.), *Geoindicators – Assessing rapid environmental changes in earth systems*, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 383-394.
- CAPOT-REY R. (1953), *Le Sahara français*, PUF, Paris.
- CHAMARD P.C. & COUREL M.F. (1999), «La forêt sahélienne menacée», *Sécheresse*, 10, pp. 11-18.
- CHAMARD P.C. & COUREL M.F. (1979), «Contribution à l'étude du Sahel voltaïque. Causes et conséquences de la dégradation du couvert végétal des dunes, Secteur de Menegou-Bidi (Département du Sahel – sous-préfecture de l'Oudalan)», *Travaux de l'Institut de Géographie de Reims*, pp. 39-40; pp. 75-90.
- CLARKS LABS (2001), *Global change data archive*, vol. 1, Africa Monthly Vegetation Index (NDVI) 1982-1999 (CD-ROM).
- CUNY P. & SORG J.P. (2003), «Forêt et coton au sud du Mali: cas de la commune rurale de Sorobasso», *Bois et Forêts des Tropiques*, 276, pp. 17-31.
- DAI A., TRENBERTH K.E. & KARL T.R. (1998), «Global variations in droughts and wet spells: 1900-1995», *Geophysical Research Letters*, 25, pp. 3367-3370.
- DAVENPORT M.L. & NICHOLSON S.E. (1993), «On the relation between rainfall and Normalized Difference Vegetation

Index for diverse vegetation types in East Africa», *International Journal of Remote Sensing*, 12, pp. 2369-2389.

- DIOUF A. & LAMBIN E.F. (2001), «Monitoring land-cover changes in semi-arid regions: remote sensing data and field observations in the Ferlo, Senegal», *Journal of Arid Environments*, 48, pp. 129-148.
- EKLUNDH L. & OLSSON L. (2003), «Vegetation index trends for the African Sahel 1982-1999», *Geophysical Research Letters*, 30, doi10.1029/2002GL016772.
- ELLIOTT D.C. (1996), «A conceptual framework for geoenvironmental indicators», in BERGER A.R. & IAMS W.J. (eds.), *Geoindicators – Assessing rapid environmental changes in earth systems*, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 337-349.
- FAO/GIEWS (2000), WINDISP 5.1 <http://www.fao.org/giews/english/win-disp/manuals>.
- FAO (2001), *State of the world's forests 2001*, FAO, Rome.
- FAO (2004), FAOSTATS – Statistics Database, <http://apps.fao.org/>
- 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, pp. 283-293.
- GLENN E., STAFFORD SMITH M. & SQUIRES V. (1998), «On our failure to control desertification: implications for global change issues, and a research agenda for the future», *Environmental Science and Policy*, 1, pp. 71-78.
- GOMMES R. (1998), «Some aspects of climate variability and food security in the sub-Saharan Africa», in DEMAREE G., ALEXANDRE J. & DE DAPPER M. (eds.), *Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology*, Royal Meteorological Institute of Belgium / Royal Academy of Overseas Sciences, 1, pp. 655-673.
- GONZALEZ P. (2001), «Desertification and a shift of forest species in the West African Sahel», *Climate Research*, 17, pp. 217-228.
- GOUROU P. (1970), *L'Afrique*, Hachette, Paris.
- GRIST J., NICHOLSON S.E. & MPOLOKANG A. (1997), «On the use of NDVI for estimating rainfall fields in the Kalahari of Botswana», *Journal of Arid Environments*, 35, pp. 195-214.
- HELLDEN U. (1991), «Desertification – Time for an assessment?», *Ambio*, 20, pp. 372-383.
- HESS T., STEPHENS W. & THOMAS G. (1996), «Modelling NDVI from decadal rainfall data in the North East arid zone of Nigeria», *Journal of Environmental Management*, 48, pp. 249-261.
- HIERNAX P. & TURNER M.D. (2002), «The influence of farmer and pastoralist management practices on desertification processes in the Sahel», in REYNOLDS J.F. & STAFFORD SMITH D.M. (eds.), *Global desertification: Do humans cause deserts?*, Dalhem University Press, pp. 135-148.
- HOLBEN B.N. (1986), «Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data», *International Journal of Remote Sensing*, 7, pp. 1417-1434.
- HOLLING C. S. (1973), «Resilience and stability of ecological systems», *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, pp. 1-23.
- 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*, in press.
- HULME M. (1996), «Recent climatic change in the world's drylands», *Geophysical Research Letters*, 23, pp. 61-64.
- HULME M. (2001), «Climatic perspectives on Sahelian dessication: 1973-1998», *Global Environmental Change*, 11, pp. 19-29.
- JACOBBERGER-JELLISON P.A. (1994), «Detection of post-drought environmental conditions in the Tombouctou region», *International Journal of Remote Sensing*, 15, pp. 3183-3197.
- JUSTICE C.O., DIGDALE G., TOWNSHEND J.R.G., NARRACOTT A.S. and KUMAR M. (1991), «Synergism between NOAA-AVHRR and Meteosat data for studying vegetation development in semiarid West Africa», *International*

- Journal of Remote Sensing*, 12, pp. 1349-1368.
- KARIMOUNE S. (1994), *Contribution à l'étude géomorphologique de la région de Zinder (Niger) et analyse par télédétection de l'évolution de la désertification*, Thèse de doctorat, Université de Liège.
 - KUBEROW H. (1990), «Anwendung von LANDSAT-daten zur erfassung der vegetationsdynamik in desertifikationsgefährdeten gebieten Malis», *Die Erde*, 121, pp. 39-53.
 - KUBEROW H. (1994), «Quantitative und qualitative erfassung von vegetationsänderungen – Ein beispiel aus dem Südsahel Malis», *Die Erde*, 125, pp. 35-56.
 - L'HÔTE T., MAHÉ G., SOMÉ B. & TRIBOULET J.P. (2002), «Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000: the drought continues», *Hydrological Sciences Journal*, 47, pp. 563-572.
 - LE HOUÉROU H.N. (1990), «Définition et limites bioclimatiques du Sahara», *Sécheresse*, 1, pp. 246-259.
 - LINDQVIST S. & TENGBERG A. (1994), «New evidence of desertification from case studies in Northern Burkina Faso», *Desertification Control Bulletin*, 25, pp. 54-60.
 - MABBUTT J.A. (1986), «Desertification indicators», *Climatic Change*, 9, pp. 113-122.
 - MAHAMAN I. (2001), «Évolution à long terme de la fertilité de la sol dans la région de Maradi», *Drylands Research Working Paper*, 30, 36 p.
 - MAINGUET M. (1991), *Desertification: Natural background and human mismanagement*, Springer-Verlag, Berlin.
 - MAINGUET M., DUMAY F., OULD EL HACEN M.L. & MAEFLOUDH A. (2001), «Diagnostic par la télédétection d'un changement de rythme de la dynamique éolienne: période d'amorce de la désertification en Mauritanie saharo-sahélienne», *Télédétection*, 2, pp. 129-136.
 - MALO A.R. & NICHOLSON S.E. (1990), «A study of the rainfall and vegetation dynamics in the African Sahel using the Normalized Difference Vegetation Index», *Journal of Arid Environments*, 19, pp. 1-24.
 - MILICH L. & WEISS E. (2000a), «GAC NDVI interannual coefficient of variation (CoV) images: ground truth sampling of the Sahel along north-south transects», *International Journal of Remote Sensing*, 21, pp. 235-260.
 - MILICH L. & WEISS E. (2000b), «GAC NDVI images: relationship to rainfall and potential evaporation in the grazing lands of the Gourma (northern Sahel) and in the croplands of the Niger-Nigeria border (southern Sahel)», *International Journal of Remote Sensing*, 21, pp. 261-280.
 - MOREL R. (1998), «Début de la sécheresse en Afrique de l'Ouest», in DEMARÉE G., ALEXANDRE J. & DE DAPPER M. (eds.), *Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology*, Royal Meteorological Institute of Belgium / Royal Academy of Overseas Sciences, pp. 200-211.
 - MORTIMORE M., TIFFEN M., BOUBACAR Y. & NELSON J. (2001), «Synthesis of long-term change in Maradi Derpartment, Niger, 1960-2000», *Drylands Research Working Paper*, 39, 52 p.
 - MOUAT D., LANCASTER J., WADE T., WICKHAM J., FOX C., KEPNER W. & BALL T. (1997), «Desertification evaluated using an integrated environmental assessment model», *Environment Monitoring and Assessment*, 48, pp. 139-156.
 - NASA (2000), AVHRR DATASET. http://daac.gsfc.nasa.gov/guides/GSFC/guide/avhrr_dataset.gd.html
 - NEIMANIS V. & KERR A. (1996), «Developing national environmental indicators», in BERGER A.R. & IAMS W.J. (eds.), *Geoindicators – Assessing rapid environmental changes in earth systems*, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 369-376.
 - NICHOLSON S.E. (1985), «Sub-Saharan rainfall 1981-84», *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 24, pp. 1388-1391.
 - 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, pp. 209-241.
 - NICHOLSON S.E., TUCKER C.J. & BA M.B. (1998), «Desertification, drought, and surface vegetation: an example from

- the West African Sahel», *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, pp. 815-829.
- OZER P. (2000), «Les lithométéores en région sahélienne», *GEO-ECO-TROP*, 24, pp. 1-317.
 - OZER P. (2002), «Les lithométéores au Niger: mise au point», *Würzburger Geographische Arbeiten*, 97, pp. 7-32.
 - OZER P. (2004), «Bois de feu et déboisement au Sahel: mise au point», *Sécheresse*, 15, pp. 243-251.
 - OZER P., ERPICUM M., DEMAREE G. & VANDIEPENBEECK M. (2003), «The Sahelian drought may have ended during the 1990s», *Hydrological Sciences Journal*, 48, pp. 489-492.
 - PARE L. & TALLET B. (1999), «D'un espace ouvert à un espace saturé: Dynamique foncière et démographique dans le département de Kouka (Burkina Faso)», *Espace, Populations, Sociétés*, 37, pp. 83-92.
 - PEARCE F. (2002), «Africans go back to the land as plants reclaim the desert», *New Scientist*, 175, pp. 4-5.
 - PRINCE S.D., BROWN DE COLSTOUN E. & KRAVITZ L.L. (1998), «Increased rain-use efficiencies indicate no extensive Sahelian desertification», *Global Change Biology*, 4, pp. 359-374.
 - PRINCE S.D. (2002), «Spatial and temporal scales for detection of desertification», in REYNOLDS J.F. and STAFFORD SMITH D.M. (eds.), *Global desertification: Do humans cause deserts?*, Dalhem University Press, pp. 23-40.
 - QUEZEL P. (1965), *La végétation au Sahara. Du Tchad à la Mauritanie*, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
 - RAPP A. (1974), *A review of desertification in Africa: Water, vegetation, and man*, Secretariat for International Ecology, Sweden (SIES), Report 1, 77 p.
 - RASMUSSEN K., FOG B. and MADSEN J.E. (2001), «Desertification in reverse? Observations from northern Burkina Faso», *Global Environmental Change*, 11, pp. 271-282.
 - RICHARD-MOLARD J. (1949), *Afrique Occidentale Française*, Editions Berger-Levrault, Paris.
 - RIGINA O. & RASMUSSEN M.S. (2003), «Using trend line and principal component analysis to study vegetation changes in «Senegal 1986-1999 from AVHRR NDVI 8 km data»», *Geografisk Tidsskrift*, 103, pp. 31-42.
 - ROUSSE J.W., HAAS R.H., SCHELL J.A. and DEERING D.W. (1973), «Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS», in *ERTS symposium*, NASA, SP-351, Washington DC, vol. 1, pp. 309-317.
 - SENE S. & OZER P. (2002), «Evolution pluviométrique et relation inondations – événements pluvieux au Sénégal», *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 42, pp. 27-33.
 - SIVAKUMAR M.V.K. & HATFIELD J.L. (1990), «Spatial variability of rainfall at an experimental station in Niger, West Africa», *Theoretical and Applied Climatology*, 42, pp. 33-39.
 - SYMEONAKIS E. & DRAKE N. (2004), «Monitoring desertification and land degradation over sub-Saharan Africa», *International Journal of Remote Sensing*, 25, pp. 573-592.
 - THOMAS D.S.G. & MIDDLETON N.J. (1994), *Desertification: Exploding the Myth*, John Wiley, Chichester.
 - THOMAS D.S.G. (1993), «Sandstorm in a teacup? Understanding desertification», *The Geographical Journal*, 159, pp. 318-331.
 - TOTTRUP C. & RASMUSSEN M.S. (2004), «Mapping long-term changes in savannah crop productivity in Senegal through trend analysis of time series of remote sensing data», *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 103, pp. 545-560.
 - TUCKER C.J. & NICHOLSON S.E. (1999), «Variations in size of the Sahara Desert from 1980 to 1997», *Ambio*, 28, pp. 587-591.
 - UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME (UNDP) (2003), *Human development report 2003. Millennium development goals: a compact among nations to end human poverty*, Oxford University Press, United Nations Development Programme.
 - VALENTIN C. & D'HERBES J.M. (1999), «Niger tiger bush as a natural harvesting system», *Catena*, 37, pp. 231-256.
 - VERHEYE W.H. (1990), «Une approche

- agropédologique de la désertification», *Sécheresse*, 1, pp. 94-97.
- WICKENS G.E. (1997), «Has the Sahel a future?», *Journal of Arid Environments*, 37, pp. 649-663.
 - WORLD BANK (2002), *World development report 2003: Sustainable development in a dynamic world: transforming institutions, growth, and quality of life*, Oxford University Press, World Bank.
-

Yvon-Carmen HOUNTONDJI

Département des Sciences et Gestion de l'Environnement, Université de Liège
 Avenue de Longwy 185
 B-6700 Arlon, Belgique
 Téléphone: +32 63 230 975
 Télécopieur: +32 63 230 800

Laboratoire d'Etude et de recherche Forestière, Faculté d'Agronomie,
 Université de Parakou
 Téléphone: +229 23 61 20 10
 BP. 123 Parakou, Bénin

Jacques NICOLAS

Département des Sciences et Gestion de l'Environnement, Université de Liège
 Avenue de Longwy 185
 B-6700 Arlon, Belgique
 Téléphone: +32 63 230 857
 Télécopieur: +32 63 230 800

Nestor SOKPON

Laboratoire d'Etude et de recherche Forestière, Faculté d'Agronomie
 Université de Parakou
 Téléphone: +229 23 61 20 10
 BP. 123 Parakou, Bénin

Pierre OZER

Département des Sciences et Gestion de l'Environnement, Université de Liège
 Avenue de Longwy 185
 B-6700 Arlon, Belgique
 Téléphone: +32 63 230 975
 Télécopieur: +32 63 230 800

Correspondant principal : pozer@ulg.ac.be

manuscrit déposé en juin 2005; révisé en décembre 2005