

Mise en évidence des zones touchées par la désertification par télédétection à basse résolution au Niger

Identification of areas affected by desertification in Niger using low resolution satellite data

Yvon-Carmen HOUNTONDJI^{1,2}, [Pierre OZER](#)¹ et Jacques NICOLAS¹

¹ Département des Sciences et Gestion de l'Environnement, Université de Liège
Avenue de Longwy 185, B-6700 Arlon, Belgique

² Institut National des Recherches Agricoles du Bénin, B.P. 1515 Calavi, Bénin

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 étudiés. 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 de 1981 à 1999. L'évaluation qualitative de la dynamique à long terme du couvert végétal a été réalisée grâce à l'analyse de tendance des valeurs maximales annuelles du NDVI par rapport aux précipitations pendant la période de végétation pour chacun des points étudiés. Sur la période analysée, il ressort que 98% des résultats obtenus pour les précipitations contre 76% des valeurs du NDVI_{Max}/RR 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 NDVI_{Max}/RR montrent un déclin généralisé de l'efficacité de l'utilisation de l'eau par la végétation avec une tendance non significative pour les stations situées dans le Sahel pastoral ($p=0,52$), hautement significative pour celles localisées dans la zone sahélienne à culture sous pluie ($p=0,00009$) et significative dans le Sahel méridional ($p=0,041$). Au total, sur les 109 stations étudiées, 75,3% d'entre elles accusent une baisse du ratio NDVI_{Max}/RR. Seule une station sur quatre (24,7%) révèle une certaine stabilité de ce rapport. Les tendances négatives traduisent une diminution progressive de la productivité végétale qui se reflète dans la baisse du ratio NDVI_{Max}/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 clefs : NDVI, précipitations, tendances, désertification, Niger, Sahel.

Abstract

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 (98%) recorded increasing rainfall while only 76% experienced increasing maximum NDVI. However, the combination of the two variables through the ratio shows a widespread reduction of the rain-use efficiency with non significant trend for the stations located in northern Sahel ($p=0.52$), highly

significant for those located in central Sahel ($p=0.00009$) and significant in southern Sahel ($p=0.041$). Overall, 75.3% of the sample recorded a significant reduction of the NDVI_{Max}/RR ratio. Only one station out of four (24.7%) presented a stability of the ratio. These negative trends suggest a progressive diminution of the vegetation productivity as highlighted by the lowering of the NDVI_{Max}/RR ratio. This situation suggest a consistently environmental degradation and that desertification processes continued during the last two decades over most of the Sahelian belt of Niger.

Keywords: NDVI, rainfall, trends, desertification, Niger, Sahel.

1 INTRODUCTION

Le terme désertification fut utilisé pour la première fois par Aubreville, en 1949, pour décrire le processus de changement de végétation menant à des sols dégradés et/ou dénudés en Afrique tropicale. Il fut ensuite repris par Tricart (1954) pour désigner la remise en mouvement des dunes dues à la dégradation anthropique suite au surpâturage et à l'extension inconsidérée d'une culture spéculative. Il écrit (p. 131) : « *Le patrimoine naturel est gravement menacé, et, avec lui, le droit à la vie des générations futures* ».

Depuis 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 21^e siècle (World Bank, 2002). Cependant, le terme désertification est souvent galvaudé et malheureusement confondu avec la sécheresse (Thomas, 1993). La désertification est souvent réduite à l'image d'une avancée du désert avec des dunes vives recouvrant habitations, moyens de communication, oasis et terres fertiles. Le mythe n'est pas neuf et est tenace. En 1935, Stebbing affirmait que le Sahara au nord de Tahoua, Niger, avançait à une vitesse moyenne de 1 kilomètre par an. L'auteur se basait alors sur des observations ponctuelles de dégradation anthropique de l'environnement au Niger et au nord du Nigeria formant des « petits Sahara » provoqués par les incendies de forêt, le déboisement incontrôlé, le surpâturage et les types de cultures non appropriés. Quarante ans plus tard, Lamprey (1975), sur base de données cartographiques de 1958 et de photographies aériennes de 1975, estima que le sud du Sahara avançait à une vitesse moyenne de 5,5 kilomètres par an dans l'ouest du Soudan. Ces conclusions ont été scientifiquement rejetées après plusieurs mises au point (Forse, 1989 ; Binns, 1990 ; Hellden, 1991). En outre, une série d'études basées sur l'analyse de données satellitaires à basse résolution a démontré que le Sahara répondait naturellement aux fluctuations pluviométriques, pouvant s'étendre durant les périodes de sécheresse et se contracter avec le retour des pluies (Tucker *et al.*, 1991, 1994 ; Tucker et Nicholson, 1999 ; Nicholson *et al.*, 1998).

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). Ainsi, chaque discipline, chaque école, a sa propre définition de la désertification (Verstraete, 1986). Le concept même de désertification a fortement évolué au cours de ces quarante dernières années (Mainguet, 1991 ; Warren et Khogali, 1992 ; Thomas, 1993). Plus de 130 définitions de la désertification ont ainsi été recensées dans la littérature (Mainguet, 1990).

Conscientes que la désertification devenait un problème majeur peu étudié et, interpellées par la première grande sécheresse sahélienne des années soixante-dix, les Nations Unies ont organisé la première Conférence sur la désertification et y ont adopté, en 1977, un Plan

d'action de lutte contre la désertification (United Nations, 1978). Cependant, en dépit de cette initiative et de tant d'autres efforts, le Programme des Nations Unies pour l'Environnement devait conclure, en 1991, que la dégradation des sols et la désertification s'étaient aggravées dans le monde. Ainsi, la problématique de la lutte contre la désertification était-elle à l'ordre du jour lors de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement mieux connue sous le nom de Conférence de Rio 1992. A la suite de cette Conférence, la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification dans les pays gravement touchés par la sécheresse et/ou la désertification, en particulier en Afrique, a été établie et ratifiée en 1994 (PNUE / CCD 1995). Il en est ressorti une définition du concept de désertification présentée sur le tableau 1.

Terme	Définition
Désertification	Dégénération des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches par suite de divers facteurs, parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines
Dégradation des terres	Diminution ou disparition, dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches, de la productivité biologique ou économique et de la complexité des terres cultivées non irriguées, des terres cultivées irriguées, des parcours, des pâturages, des forêts, ou des surfaces boisées du fait de l'utilisation des terres ou d'un ou de plusieurs phénomènes, notamment de phénomènes dus à l'activité de l'homme et à ses modes de peuplement, tels que (i) l'érosion des sols causée par le vent et/ou l'eau ; (ii) la détérioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques ou économique des sols ; et (iii) la disparition à long terme de la végétation naturelle.
Zones arides, semi-arides et subhumides sèches	Zones, à l'exclusion des zones arctiques et subarctiques, dans lesquelles le rapport entre les précipitations annuelles et l'évapotranspiration possible se situe dans une fourchette allant de 0.05 à 0.65.

Tableau 1 : Définitions clefs de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification dans les pays gravement touchés par la sécheresse et/ou la désertification, en particulier en Afrique (PNUE / CCD 1995).

Table 1: Key definitions of the United Nations Convention to Combat Desertification in Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, Particularly in Africa (PNUE / CCD 1995).

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 peut être défini comme une mesure 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. Un indicateur 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 accepté au niveau international 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.

2 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 20^{ème} siècle (Hulme, 1996 ; Morel, 1998 ; Dai *et al.*, 1998). Le paroxysme de cette sécheresse a été atteint durant la première moitié des années quatre-vingt (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 surexploitation des sols et des ressources hydriques, le surpâturage, le piétinement, les migrations des populations vers le sud ou vers les noyaux urbains et la sédentarisation 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 (Gommes, 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).

3 Utilisation de la télédétection dans l'étude de la désertification

3.1 *Images satellitaires à haute résolution*

Les analyses multi-temporelles, réalisées à partir d'images satellites à haute résolution (1 à 30 mètres de résolution spatiale) jusqu'à présent, 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 datant de l'époque de la guerre froide et, plus récemment, des images à très haute résolution comme IKONOS (1 mètre de résolution spatiale). Ces études sont le plus fréquemment supportées par des missions de réalité de terrain ainsi qu'à 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 dégradés 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 ; Gueye et Ozer, 2000 ; N'Djafa Ouaga et Courel, 2000 ; 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, seule une étude recensée présente de manière précise la désertification comme un processus irréversible (Karimoune, 1994). Le travail de cet auteur, réalisé à partir de la comparaison de photographies aériennes de 1957 et de 1975 ainsi que d'une image satellite HRV de SPOT de 1987, met en évidence la dégradation environnementale dans la zone semi-aride dans le sud-est du Niger (pluviométrie annuelle moyenne de l'ordre de 350 mm). En 1957-1958, la végétation est relativement dense (36% de la zone étudiée) et les remaniements éoliens sont quasi inexistant (6%). Après la première grande sécheresse, l'image de 1975 met en évidence la disparition de la plus grande partie de la végétation (réduite à 14%) notamment dans les lits d'oueds. La remobilisation des sables affecte des superficies plus étendues (14%)

et se situe en particulier sur les sommets des dunes et dans les auréoles autour des villages. A la suite de la terrible sécheresse du début des années quatre-vingts (image 1987), le secteur balayé par la déflation s'est considérablement élargi (23%), traduisant la progression de la dégradation environnementale. La végétation a été réduite de moitié par rapport à 1975 (plus que 8%). Finalement, l'étude met en évidence la disparition du sol à certains endroits, faisant apparaître une cuirasse latéritique là même où le sol était recouvert d'une végétation relativement dense à la fin des années cinquante. Cet exemple précis prouve que la dégradation irréversible peut survenir très rapidement (moins de trente ans).

Dans un climat légèrement plus humide (pluviométrie annuelle moyenne de l'ordre de 500 mm), Lindqvist et Tengberg (1994) ont réalisé une étude similaire dans le nord du Burkina Faso. Leurs résultats sont très intéressants dans la mesure où l'analyse de différents sites met en évidence la vitesse variable de la dégradation des sols. Ainsi, le premier site analysé (Kolèl) a connu une dégradation intégrale entre 1955 et 1990. La savane dense continue et la steppe à couverture ligneuse discontinue qui recouvriraient 98% de la superficie de la zone d'étude en 1955 ont totalement disparu en 1990. Ces formations ont été remplacées par de la steppe à couverture végétale discontinue ou par des sols totalement dénudés. Par contre, le deuxième site étudié (Oursi) présente une dégradation plus lente et moins radicale pendant la même période. En effet, si la savane dense continue et la steppe à couverture ligneuse discontinue qui recouvriraient 78% de la superficie de la zone analysée en 1955, ces formations représentaient encore 53% du territoire étudié en 1990. Par contre, l'étendue des zones totalement dénudées et soumises aux divers processus d'érosion augmentait fortement, passant de 3 à 26% entre les mêmes dates. Cependant, à la suite des conditions pluviométriques moins défavorables enregistrées au cours des années quatre-vingt-dix, ce dernier site aurait connu un retour progressif de certaines associations végétales dans plusieurs zones dénudées durant la grande sécheresse (Rasmussen *et al.*, 2001). Ces analyses effectuées au Burkina Faso 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 excessif pour l'acquisition des données tant aériennes que satellitaires ainsi que pour la main d'œuvre et, d'autre part, le caractère local de l'étude.

3.2 *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 (de l'ordre du pays entier) 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 (Foody, 2003 ; Symeonakis et Drake, 2004).

3.3 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, la valeur de chaque pixel étant comprises entre 0 (sol nu) et 1 (couvert végétal maximal). 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 à cause de la facilité de sa mise en œuvre et surtout de sa corrélation avec la densité du couvert végétal et 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 en Afrique de l'Est (Davenport et Nicholson, 1989). 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 (Foody, 2003 ; Symeonakis et Drake, 2004).

4 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, 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 (UNEP, 2003). La population humaine y augmente de manière exponentielle de la population (+3,2% par an), et est le plus souvent totalement dépendante de son environnement direct (FAO, 2004). La diminution du couvert forestier y diminue 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).

5 DONNÉES ET MÉTHODE

5.1 Données de précipitations

Au Niger, les précipitations se concentrent de mai à septembre, avec 70 à 90% des précipitations annuelles de juin à août, 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. Ainsi, 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 sahariennes (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 enregistrant, ne saurait être représentatif de cette zone désertique qui couvre environ les 5/6^e du territoire nigérien. En définitive, sur les 109 stations étudiées, 32 sont localisées dans le Sahel septentrional, 58 dans la zone centrale et 19 dans le Sahel méridional (Fig. 1).

5.2 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. La résolution de ces images est de 10 km. L'analyse se limite à la période de 1981-1999 étant donné qu'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).

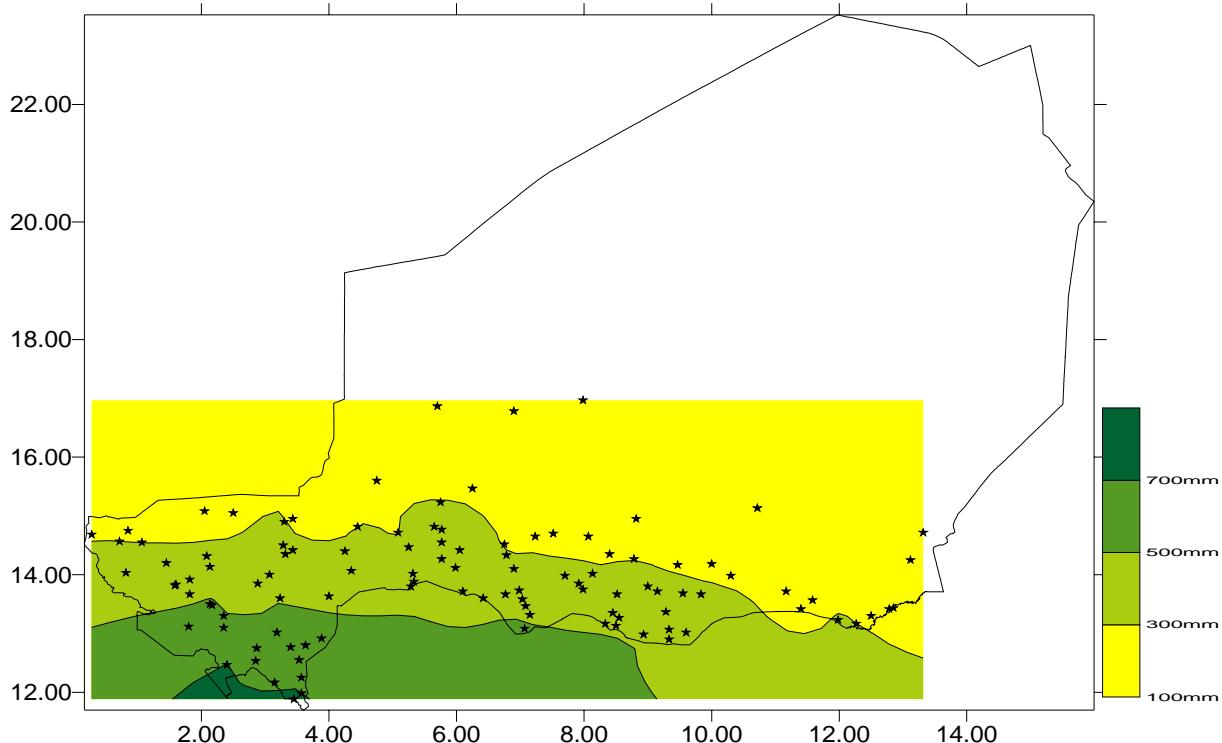


Figure 1 : Distribution spatiale des stations étudiées par zone bioclimatique au Niger.
Figure 1: Spatial distribution of the studied stations by bioclimatic area in Niger.

5.3 Méthodes

Dans cette étude, le NDVI maximum annuel ($NDVI_{Max}$) enregistré au cours de la période végétative sera comparé à la pluviométrie totale enregistrée de juin à août (RR) (Hountondji *et al.*, 2003). 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, 1989), la décision de bloquer le total pluviométrique à la fin août semble cohérent. L'évolution du $NDVI_{Max}$ 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 est motivé par le fait que, de par leur caractère local orageux, un trait caractéristique des pluies sahariennes et soudanaises est la très forte hétérogénéité spatiale (Sivakumar et Hatfield, 1990 ; Lebel *et al.*, 1996 ; Taupin *et al.*, 1998).

5.3.1 Evolution des précipitations et du $NDVI_{Max}$

L'analyse des tendances linéaires, tant des précipitations que du $NDVI_{Max}$ 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 (resp. le $NDVI_{Max}$) 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 statistique 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'alchimie 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.

5.3.2 *Rapport NDVIMax / précipitations*

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 : juin à août), le rapport NDVIMax/RR a été calculé par année pour l'ensemble des stations regroupées dans les trois zones bioclimatiques retenues. Des régressions ont été établies par zone afin d'apprécier 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).

6 RÉSULTATS

6.1 *Evolution des précipitations*

La figure 2 indique les tendances observées par station pour les précipitations de juin à août (RR) au sein des 109 stations analysées. Au total, 38% des stations analysées présentent une tendance forte à l'augmentation des précipitations et 60% montrent une tendance modérée de l'amélioration pluviométrique. Seules deux stations accusent une baisse modérée des hauteurs de pluies. Il est à signaler qu'aucune forte diminution des précipitations n'a été détectée sur la période analysée.

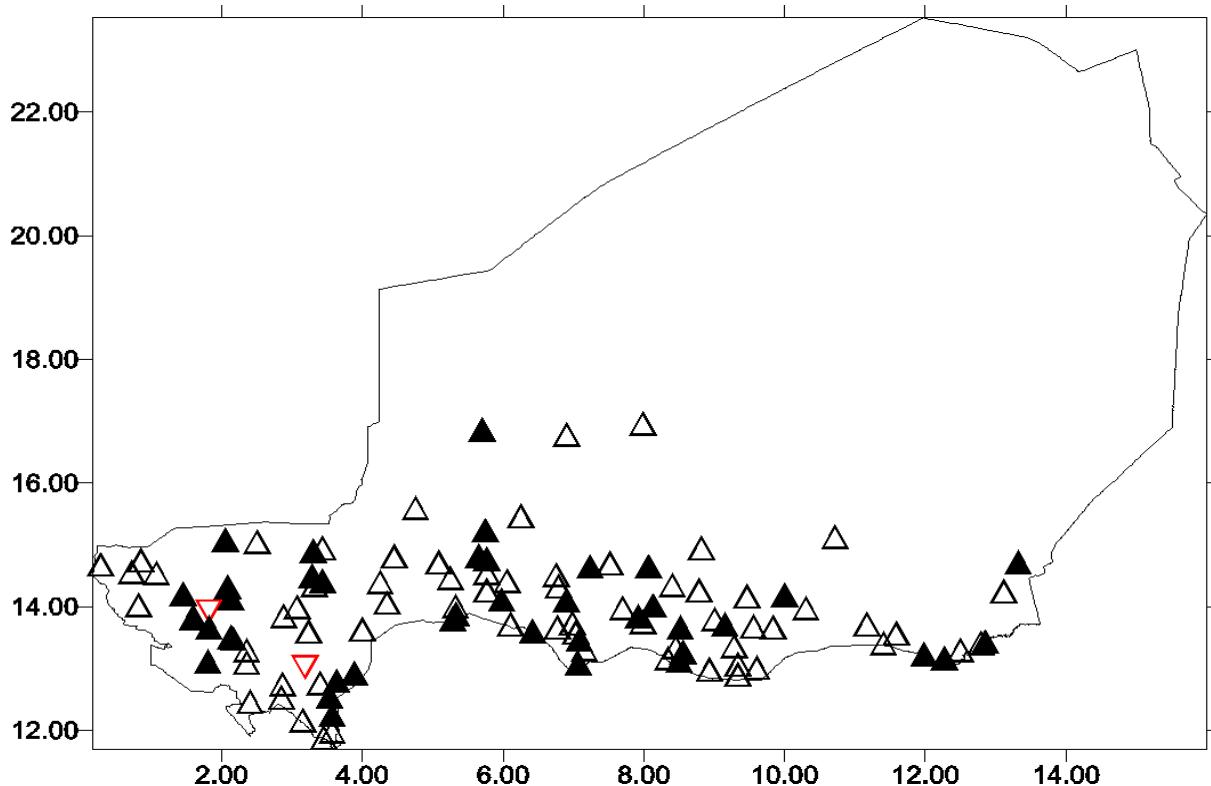


Figure 2: Evolution par station du cumul annuel des précipitations (juin à août) de 1981 à 1999 au Niger. Symboles : ▲ : forte tendance positive ; △ : tendance positive modérée ; ▽ : tendance négative modérée ; ▼ : forte tendance négative.

Figure 2: Rainfall (June to August) trends per station from 1981 to 1999 in Niger. Legend: ▲: strong positive trend; △: moderate positive trend; ▽: moderate negative trend; ▼: strong negative trend.

6.2 Evolution de l'indice de végétation maximum ($NDVI_{Max}$)

Les différentes tendances enregistrées au niveau du $NDVI_{Max}$ pour la période 1981-1999 sont présentées à la figure 3. Il en résulte que 19% des points étudiés montrent une forte tendance positive et 57% des pixels présentent une tendance modérée à la hausse. Par contre, 20% des points enregistrent une baisse modérée du $NDVI_{Max}$ et environ 4% des pixels analysés accusent une forte tendance à la baisse.

La répartition géographique des points concernés par les tendances positives ou négatives s'avère diffuse. Globalement, il ressort néanmoins que les stations montrant une tendance à la baisse du $NDVI_{Max}$ allant de modérée à forte sont cantonnées à la zone méridionale, de l'ouest à l'est du pays. Cependant, aucune agrégation spatiale de celles-ci n'a été observée. Cette situation 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.

En définitive, 98% des résultats obtenus pour les précipitations montrent une tendance à la hausse alors que seulement 76% des valeurs du $NDVI_{Max}$ sont en augmentation. Seules deux localités témoignent d'une baisse modérée des pluies alors qu'une tendance négative de l'indice de végétation s'observe dans 26 stations sur 109. Cette situation augure d'une certaine difficulté de reconstitution de la couverture végétale dans les zones ayant subi les effets dramatiques de la détérioration climatique ayant sévi dans la région au cours de la décennie 1980. Nos résultats vont directement à l'encontre des 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. 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 naturelles 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.

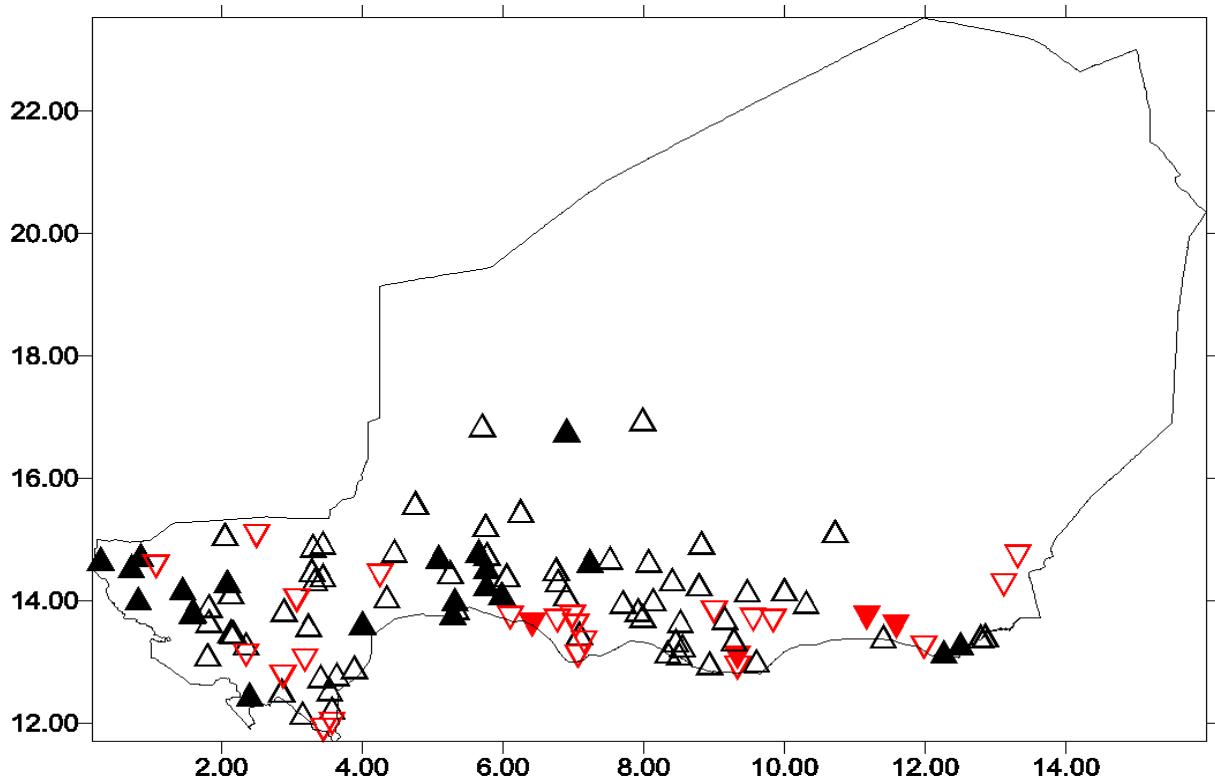


Figure 3 : Evolution par station du $NDVI_{Max}$ de 1981 à 1999 au Niger. Symboles : ▲ : forte tendance positive, △ : tendance positive modérée, ▽ : tendance négative modérée, ▼ : forte tendance négative.

Figure 3: $NDVI_{Max}$ trends per station from 1981 to 1999 in Niger. Legend: ▲: strong positive trend; △: moderate positive trend; ▽: moderate negative trend; ▼: strong negative trend.

6.3 Rapport $NDVI_{Max}/RR$

Les différentes tendances enregistrées au niveau du rapport $NDVI_{Max}/RR$ pour la période 1981-1999 sont présentées à la figure 4. L'évolution des rapports $NDVI_{Max}/RR$ pour les trois zones en fonction du temps est présentée à la figure 5. Sur ce graphique, les barres d'erreur permettent d'apprecier 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 hautement significative ($p=0,000002$, $p=0,000009$ et $p=0,00001$ pour la statistique t de Student) respectivement pour les zones 1, 2 et 3, 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 $NDVI_{Max}/RR$ et donc une augmentation de la significativité de la pente des régressions. Par contre, lorsqu'on considère uniquement la période d'après 1984, les résultats montrent toujours une décroissante du rapport $NDVI_{Max}/RR$ 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 est synthétisée sur le tableau 2.

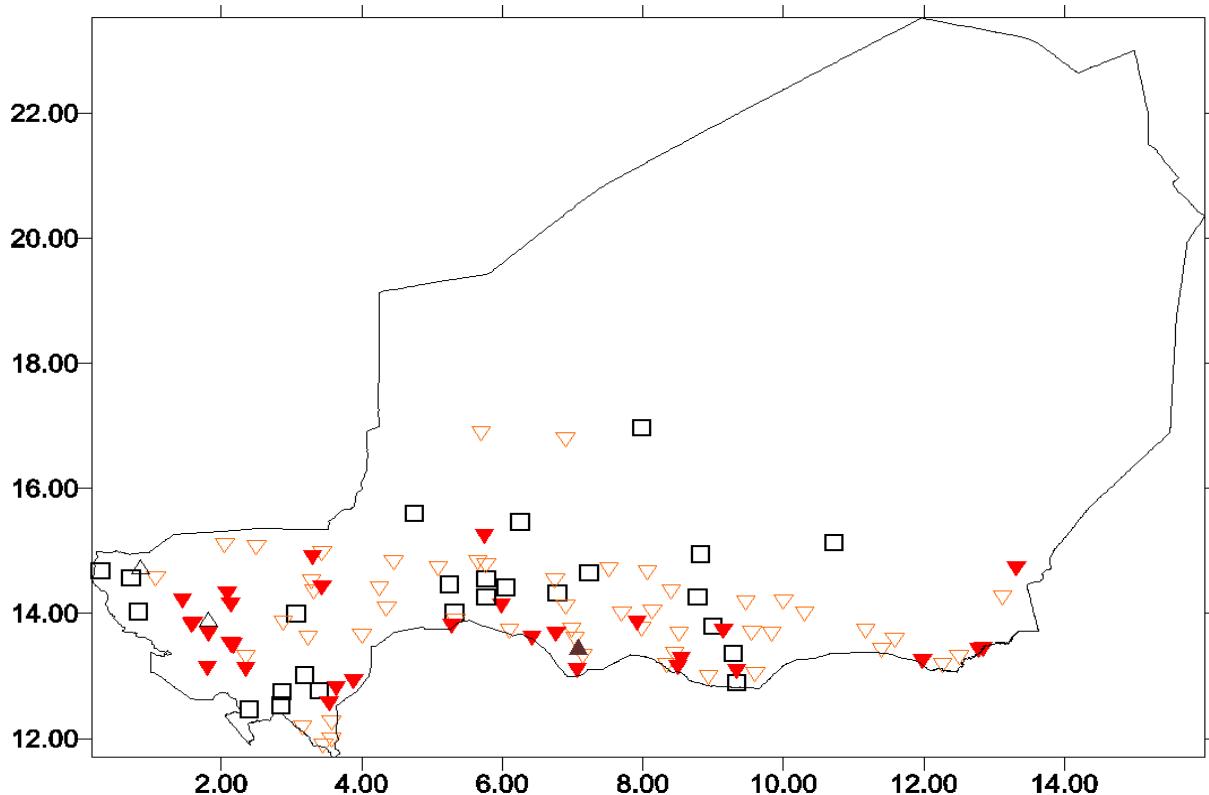


Figure 4 : Evolution par station du rapport NDVI_{Max}/RR au Niger de 1981 à 1999. Symboles :
▲ : forte tendance positive, △ : tendance positive modérée, □ : stabilité ; ▼ : tendance négative modérée, ▼ : forte tendance négative.

Figure 4: Ratio NDVI_{Max}/RR trends per station from 1981 to 1999. Legend: ▲: strong positive trend; △: moderate positive trend; ▽: moderate negative trend; ▼: strong negative trend; □: stability.

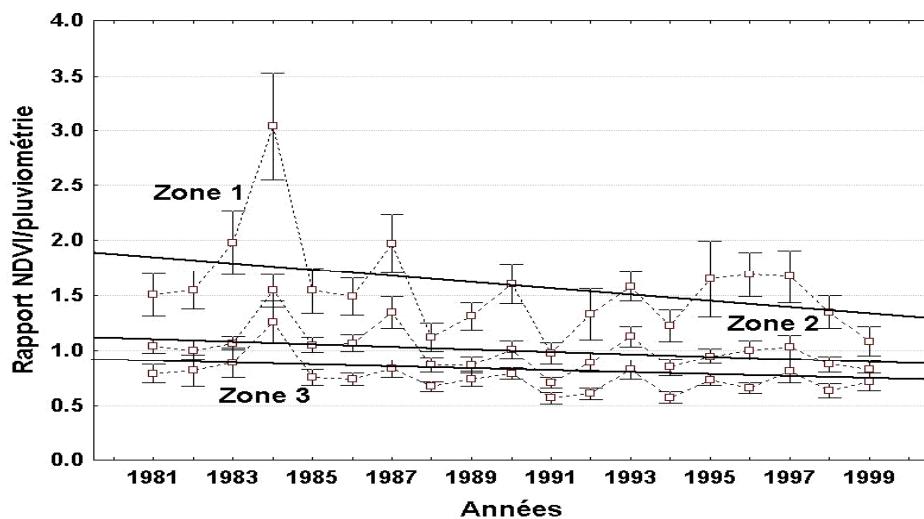


Figure 5 : Evolution du rapport NDVI_{Max}/RR dans les trois zones bioclimatiques étudiées au Niger de 1981 à 1999.

Figure 5 : Ratio NDVI_{Max}/RR trends in the three bioclimatic areas studied in Niger from 1981 to 1999.

Il en résulte que près de trois stations sur quatre montrent un déclin du rapport NDVI_{Max}/RR avec une tendance négative allant de modérée (47,8% des cas) à très forte (27,5%) pour

l'ensemble des 109 pixels analysés ; 22% des pixels témoignent d'une certaine stabilité et une seule station montre une amélioration significative de la couverture végétale consécutive à la hausse des précipitations. Il importe de signaler que le déclin significatif du rapport NDVI_{Max}/précipitations est plus marqué dans le Sahel central (32,7% des pixels analysés) et dans le Sahel méridional (27,5%) que dans la zone sub-désertique (9,4% des points considérés). Il appert donc que la baisse du rapport NDVI_{Max}/RR laisse ainsi entrevoir une extension globale du phénomène de dégradation de la végétation, qui s'accentue notamment dans les zones de production et de pâturage.

Typologie de la tendance	Zones bioclimatiques						Total (stations étudiées)			
	Sahel septentrional		Sahel central		Sahel méridional					
	Nombre de stations	Taux %	Nombre de stations	Taux %	Nombre de stations	Taux %				
Forte tendance positive	0	0	1	1,7	0	0	1	0,9		
Tendance positive modérée	1	3,2	1	1,7	0	0	2	1,8		
Stabilité	7	21,8	12	20,8	5	26,3	24	22		
Tendance négative modérée	21	65,6	25	43,1	6	31,6	52	47,8		
Forte tendance négative	3	9,4	19	32,7	8	42,1	30	27,5		
Total	32		58		19		109			

Tableau 2 : Classification des pixels en fonction des tendances de la pente du rapport NDVI_{Max}/RR dans les trois zones bioclimatiques étudiées.

Table 2: Pixels classification according to the trends of the ratio NDVI_{Max}/RR slope in the three bioclimatic areas.

7 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 d'un pixel sur quatre a par contre enregistré une baisse de la productivité végétale reflétée dans le cadre de cette étude par le NDVI_{Max}. La répartition géographique de ces points connaissant une probable dégradation de l'état de la végétation est très disparate et pourrait être le signe de dégradation par mitage. Cependant, il est intéressant de constater que le pourcentage des points subissant cette diminution du NDVI_{Max} augmente du nord vers le sud, avec 19% des pixels considérés dans le Sahel pastoral et 37% dans le Sahel méridional, soit la zone connaissant la plus forte concentration de population. Ces résultats sont en accord avec ceux de Rigma et Rasmussen (2003) qui observent, de 1986 à 1999 au Sénégal, une baisse du NDVI au niveau de 25% et 53% des pixels dans respectivement la zone pastorale dans le nord du pays et la région agricole au centre qui peut être assimilée au Niger à la zone sahélienne méridionale.

L'analyse du rapport NDVI_{Max}/RR a été suggéré par divers auteurs (Nicholson *et al.*, 1998 ; Prince *et al.*, 1998 ; Symeonakis et 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 durant les années 1980. 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 étudiés. Ainsi, la tendance observée sur la période après la sécheresse (1985-1999), montre toujours une diminution notable du rapport NDVI_{Max}/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. 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 NDVI_{Max}/RR. Il pourrait en aller de même pour la réduction des zones naturelles au profit des zones agricoles (Mortimore *et al.*, 2001).

8 CONCLUSION

Il appert que l'indicateur proposé 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 paraît 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 préliminaire 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 Science de l'Environnement, dans le cadre de laquelle cette recherche a été réalisée.

Références

- Andrews, F.W. (1949) The vegetation in the Soudan. In: Agriculture in the Soudan. Tothill J.D. ed., Oxford University Press, London : 32-61.
Aubreville, A. (1949) Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Société d'Editions Géographiques, Maritimes et Coloniales, Paris, 351 p.

Cybergeo : Revue européenne de géographie, N° 291, 10 novembre 2004

- Berger, A.R. (1996) Introduction to geoindicator checklist. In : Geoindicators – Assessing rapid environmental changes in earth systems. Berger, A.R. et Iams, W.J. eds., A.A. Balkema, Rotterdam : 383-394.
- Capot-Rey, R. (1953) Le Sahara français. PUF, Paris. 564 p.
- Chamard, P.C. et Courel, M.F. (1999) La forêt sahélienne menacée. *Sécheresse*, 10 : 11-18.
- Chamard, P.C. et 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*, 39-40 : 75-90.
- Clarks Labs (2001) Global change data archive, Vol. 1: Africa Monthly Vegetation Index (NDVI) 1982-1999 (CD-ROM).
- Cuny, P. et Sorg, J.P. (2003) Forêt et coton au sud du Mali : cas de la commune rurale de Sorobasso. *Bois et Forêts des Tropiques*, 276 : 17-31.
- Dai, A., Trenberth, K.E. et Karl, T.R. (1998) Global variations in droughts and wet spells : 1900-1995. *Geophysical Research Letters*, 25 : 3367-3370.
- Davenport, M.L. et 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 : 2369-2389.
- Diouf, A. et 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 : 129-148.
- Eklundh, L. et Olsson, L. (2003) Vegetation index trends for the African Sahel 1982-1999. *Geophysical Research Letters*, 30, 10.1029/2002GL016772.
- Elliott, D.C. (1996) A conceptual framework for geoenvironmental indicators. In : Geoindicators – Assessing rapid environmental changes in earth systems. Berger, A.R. et Iams, W.J. eds., A.A. Balkema, Rotterdam : 337-349.
- FAO, (2001) *State of the world's forests 2001*. FAO, Rome. 181 p.
- 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: 283-293.
- Glenn, E., Stafford Smith, M. et 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: 71-78.
- Gommes, R. (1998) Some aspects of climate variability and food security in the sub-Saharan Africa. In : Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology. Demaree, G., Alexandre, J. et De Dapper, M. eds. Royal Meteorological Institute of Belgium / Royal Academy of Overseas Sciences, 655-673.
- Gonzalez, P. (2001) Desertification and a shift of forest species in the West African Sahel. *Climate Research*, 17 : 217-228.
- Gourou, P. (1970) L'Afrique. Hachette, Paris. 488 p.
- Grist, J., Nicholson, S.E. et Mpolokang, A. (1997) On the use of NDVI for estimating rainfall fields in the Kalahari of Botswana. *Journal of Arid Environments*, 35 : 195-214.
- Gueye, M. et Ozer, A. (2000). Apport de la télédétection à l'étude de la transformation de l'agriculture et de l'environnement dans le département de Bignona (Sénégal méridional). In : *La télédétection en Francophonie: analyse critique et perspectives*. Dubois, J.M.M., Caloz, R. et Gagnon, P. eds., AUPELF-UREF, 141-151.
- Hellden, U. (1991) Desertification – Time for an assessment ?. *Ambio*, 20 : 372-383.
- Hess, T., Stephens, W. et Thomas, G. (1996). Modelling NDVI from decadal rainfall data in the North East arid zone of Nigeria. *Journal of Environmental Management*, 48 : 249-261.
- Hiernaux, P. et Turner, M.D. (2002). The influence of farmer and pastoralist management practices on desertification processes in the Sahel. In : Global desertification: Do humans cause deserts? Reynolds, J.F. et Stafford Smith, D.M. eds., Dalhem University Press : 135-148.
- Hountondji, Y.C., Ozer, P. et Tychon B. (2003) Etude des modifications environnementales à partir des données pluviométriques et NDVI de NOAA-AVHRR en Afrique de l'Ouest . in: Les Journées des Géographes Belges, Tome 1: Evaluer la capacité du milieu, Schmitz, S. et Meert, H. (eds.), Editions BEVAS/SOBEG: 19-24.
- Hulme, M. (1996) Recent climatic change in the world's drylands. *Geophysical Research Letters*, 23 : 61-64.
- Hulme, M. (2001) Climatic perspectives on Sahelian dessication: 1973-1998. *Global Environmental Change*, 11 : 19-29.
- Jacobberger-Jellison, P.A. (1994). Detection of post-drought environmental conditions in the Tombouctou region. *International Journal of Remote Sensing*, 15 : 3183-3197.

Cybergeo : Revue européenne de géographie, N° 291, 10 novembre 2004

- Justice, C.O., Digdale, G., Townshend, J.R.G., Narracott, A.S. et Kumar, M. (1991) Synergism between NOAA-AVHRR and Meteosat data for studying vegetation development in semiarid West Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 12 : 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 en Sciences géographiques, Faculté des Sciences, Université de Liège. 350 p.
- Kuberow, H. (1990) Anwendung von LANDSAT-daten zur erfassung der vegetationsdynamik in desertifikationsgefährdeten gebieten Malis. *Die Erde*, 121 : 39-53.
- Kuberow, H. (1994) Quantitative und qualitative erfassung von vegetationsänderungen – Ein beispiel aus dem Südsahel Malis. *Die Erde*, 125 : 35-56.
- L'Hôte, T., Mahé, G., Somé, B. et Triboulet, J.P. (2002) Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues. *Hydrological Sciences Journal*, 47 : 563-572.
- Lamprey, H. (1975). Report on the desert encroachment reconnaissance in northern Sudan, Khartoum. National Council for Research, Ministry of Agriculture, Food and Natural Ressources. 16 p.
- Lebel, T., Amani, A. et Taupin, J.D. (1996) La pluie au Sahel : une variable rebelle à la régionalisation. In : Interactions surface continentale / atmosphère : l'expérience Hapex-Sahel. Hoepffner, M., Lebel, T. et Monteny, B. eds., ORSTOM Editions, Collection Colloques et Séminaires : 353-372.
- Le Houérou, H.N. (1990). Définition et limites bioclimatiques du Sahara. *Sécheresse*, 1 : 246-259.
- Lindqvist, S. et Tengberg, A. (1994) New evidence of desertification from case studies in Northern Burkina Faso. *Desertification Control Bulletin*, 25 : 54-60.
- Mabbutt, J.A. (1986) Desertification indicators. *Climatic Change*, 9 : 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. (1990) La désertification: une crise autant socio-économique que climatique. *Sécheresse*, 1 : 187-195.
- Mainguet, M. (1991) Desertification : Natural background and human mismanagement. Springer-Verlag, Berlin. 306 p.
- Mainguet, M., Dumay, F., Ould El Hacen, M.L. et Maefoudh, 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 : 129-136.
- Malo, A.R. et 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 : 1-24.
- Milich, L. et 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 : 235-260.
- Milich, L. et 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 : 261-280.
- Morel, R. (1998) Début de la sécheresse en Afrique de l'Ouest. In : Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology. Demarée, G., Alexandre, J. et De Dapper, M. eds. Royal Meteorological Institute of Belgium / Royal Academy of Overseas Sciences, 200-211.
- Mortimore, M., Tiffen, M., Boubacar, Y. et Nelson, J. (2001) Synthesis of long-term change in Maradi Derpartment, Niger, 1960-2000. Drylands Research Working Paper, 39e. 52 p.
- Mouat, D., Lancaster, J., Wade, T., Wickham, J., Fox, C., Kepner, W. et Ball, T., (1997) Desertification evaluated using an integrated environmental assessment model. *Environment Monitoring and Assessment*, 48 : 139-156.
- Movik, S., Dejene, S. et Synnevag, G. (2003) Poverty and environmental degradation in the drylands. An overview of problems and processes. Noragric Working Paper No. 29, Noragric, Agricultural University of Norway. 50 p.
- N'Djafa Ouaga, H. et Courel, M.F. (2000) Utilisation de l'imagerie aérienne et satellitaire pour l'analyse de la mutation des espaces ruraux: cas de la sous-préfecture de Mandélia dans le département de Hadjer Lamis au Tchad. In : *La télédétection en Francophonie: analyse critique et perspectives*. Dubois, J.M.M., Caloz R. et Gagnon P. eds., AUPELF-UREF, 177-185.
- Neimanis, V. et Kerr, A. (1996) Developping national environmental indicators. In : Geoindicators – Assessing rapid environmental changes in earth systems. Berger, A.R. et Iams, W.J. eds., A.A. Balkema, Rotterdam : 369-376.

Cybergeo : Revue européenne de géographie, N° 291, 10 novembre 2004

- Nicholson, S.E. (1985) Sub-Saharan rainfall 1981-84. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 24 : 1388-1391.
- Nicholson, S.E., Davenport, M.L. et Malo, A.R. (1990) A comparison of the vegetation response to rainfall in the Sahel and East Africa, using normalized difference vegetation index from NOAA AVHRR. *Climatic Change*, 17 : 209-241.
- Nicholson, S.E., Tucker, C.J. et Ba, M.B. (1998). Desertification, drought, and surface vegetation : an exemple from the West African Sahel. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79 : 815-829.
- Ozer, P. (2000) Les lithométéores en région sahélique. *GEO-ECO-TROP.*, 24: 1-317.
- Ozer, P. (2002) Les lithométéores au Niger: mise au point. *Würzburger Geographische Arbeiten*, 97: 7-32.
- Ozer, P. (2004) Bois de feu et déboisement en région sahélique: mise au point. *Sécheresse*, sous presse.
- Ozer, P., Erpicum, M., Demaree, G. et Vandiepenbeeck M. (2003) The Sahelian drought may have ended during the 1990s. *Hydrological Sciences Journal*, 48 : 489-492.
- Pare, L. et 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 : 83-92.
- Pearce, F. (2002) Africans go back to the land as plants reclaim the desert. *New Scientist*, 175: 4-5.
- PNUE / CCD, (1995) Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification dans les pays gravement touchés par la sécheresse et/ou la désertification, en particulier en Afrique. 71 p.
- Prince, S.D. (2002). Spatial and temporal scales for detection of desertification. In : Global desertification: Do humans cause deserts? Reynolds, J.F. et Stafford Smith, D.M. eds., Dalhem University Press : 23-40.
- Prince, S.D., Brown de Colstoun, E. et Kravitz, L.L. (1998) Increased rain-use efficiencies indicate no extensive Sahelian desertification. *Global Change Biology*, 4 : 359-374.
- Quezel, P. (1965) La végétation au Sahara. Du Tchad à la Mauritanie. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart. 333 p.
- Rapp, A. (1974) A review of desertization in Africa: Water, vegetation, and man. Secretariat for International Ecology, Sweden (SIES), Report 1. 77 p.
- Rasmussen, K., Fog, B. et Madsen, J.E., 2001. Desertification in reverse? Observations from northern Burkina Faso. *Global Environmental Change*, 11 : 271-282.
- Richard-Molard, J. (1949) Afrique Occidentale Française. Editions Berger-Levrault, Paris. 239 p.
- Rigina, O. et 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: 31-42.
- Sene, S. et Ozer, P. (2002) Evolution pluviométrique et relation inondations – événements pluvieux au Sénégal. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, sous presse.
- Sivakumar, M.V.K. et Hatfield, J.L. (1990) Spatial variability of rainfall at an experimental station in Niger, West Africa. *Theoretical and Applied Climatology*, 42 : 33-39.
- Stebbing, E.P. (1935) The encroaching Sahara : the threat of the West African Colonies. *The Geographical Journal*, 85 : 506-524.
- Symeonakis, E. et Drake, N. (2004) Monitoring desertification and land degradation over sub-Saharan Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 25 : 573-592.
- Taupin, J.D., Amani, A. et Lebel, T. (1998) Variabilité spatiale des pluies au Sahel : une question d'échelles – 1. Approche expérimentale. In : Water resources variability in Africa during the XXth century. Servat, E., Hugues, D., Fritsch, J.M. et Hulme, M. eds., IAHS Publication N° 252 : 143-151.
- Thomas, D.S.G. et Middleton, N.J., 1994. Desertification : Exploding the Myth. Wiley, Chichester. 194 p.
- Thomas, D.S.G. (1993) Sandstorm in a teacup ? Understanding desertification. *The Geographical Journal*, 159 : 318-331.
- Tottrup, C. et 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*, in press.
- Tricart, J. (1954) Influence des sols salés sur la déflation éolienne en basse Mauritanie et dans le delta du Sénégal. *Revue de Géomorphologie Dynamique*, 5 : 124-132.
- Tucker, C.J. et Nicholson, S.E. (1999) Variations in size of the Sahara Desert from 1980 to 1997. *Ambio*, 28 : 587-591.
- UNCCD (1997) Supplementary report on work on benchmarks and indicators. Committee on Science and Technology, Conference of the Parties. 5 p.
- 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. 367 p.
- United Nations (1978) Desertification : Its causes and consequences. Pergamon Press. 448 p.

Cybergeo : Revue européenne de géographie, N° 291, 10 novembre 2004

- Valentin, C. et d'Herbes, J.M. (1999) Niger tiger bush as a natural harvesting system. *Catena*, 37 : 231-256.
- Verheyen, W.H. (1990) Une approche agropédologique de la désertification. *Sécheresse*, 1 : 94-97.
- Verstraete, M.M. (1986) Defining desertification : A review. *Climatic Change*, 9 : 5-18.
- Wang, J., Rich, P.M. et Price, K.P. (2003) Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains. *International Journal of Remote Sensing*, 24 : 2345-2364.
- Warren, A. et Khogali, M. (1992) Evaluation de la désertification et de la sécheresse dans la région soudano-sahélienne (1985-1991). BNUS / PNUD, New York, 102 p.
- Wickens, G.E. (1997) Has the Sahel a future ?. *Journal of Arid Environments*, 37 : 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. 272 p.

© CYBERGEO 2004

HOUNTONDJI Y-C., OZER P, NICOLAS J., Cybergeo, No. 291, 10 novembre 2004