

# DÉSERTIFICATION AU SAHEL : HISTORIQUE ET PERSPECTIVES

Pierre OZER<sup>1\*</sup>, Yvon-Carmen HOUNTONDJI<sup>2</sup>, Abdoul Jelil NIANG<sup>3</sup>, Salifou KARIMOUNE<sup>4</sup>,  
Ousmane LAMINO MANZO<sup>5</sup>, Marc SALMON<sup>6</sup>

(1) *Dépt des Sciences et Gestion de l'Environnement, Université de Liège, Avenue de Longwy 185, 6700 Arlon, Belgique*

(2) *Faculté d'Agronomie, Université de Parakou, Parakou, Bénin*

(3) *Université de Nouakchott, Nouakchott, Mauritanie*

(4) *Ecole Normale Supérieure, Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger*

(5) *Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger*

(6) *Département de Géographie, Université de Liège, Liège, Belgique*

\* *Auteur correspondant. E-mail: pozer@ulg.ac.be*

## Résumé

Le Sahel, au cours de ces dernières décennies, a connu deux crises majeures de sécheresse presque contiguës. Actuellement, et depuis la fin des années 1980, la tendance pluviométrique montre, dans certaines zones, un retour vers les normes antérieures aux années 1970. Cependant, cette amélioration des totaux pluviométriques annuels semble être partiellement le fait d'une intensité des pluies plus importante, alors que la longueur de la saison des pluies n'évolue pas par rapport aux décennies de sécheresse. Par ailleurs, depuis la moitié du 20<sup>e</sup> siècle, la population sahélienne a plus que triplé et les prévisions pour 2050 avancent un facteur de croissance de l'ordre de 10. Les taux de croissance urbaine sont encore plus impressionnants et entraînent chaque jour d'importants bouleversements environnementaux. Une telle pression anthropique engendre un déboisement incontrôlé pour satisfaire les besoins en énergie des populations, la demande en bois d'œuvre et l'expansion agricole. En outre, le cheptel toujours plus nombreux et devant se satisfaire de parcours continuellement réduits engendre un surpâturage. Le tout provoque donc une dégradation de la couverture végétale du sol, une diminution globale des rendements des cultures, mais également une forte réduction de la biodiversité. L'article fait le point sur la controverse actuelle qui entoure les processus de désertification en Afrique de l'Ouest avant de conclure que, si les crises de sécheresse des années 1970 et 1980 ont été catastrophiques pour les populations du Sahel, les pressions anthropiques croissantes futures vont engendrer une désertification grandissante dans la bordure sud du Sahara, et ce sans compter les scénarii climatiques assez alarmants.

## Mots-clés

Sahel, désertification, sécheresse, variations climatiques

## Abstract

*Over the last decades, the Sahel of West Africa has suffered two dramatic contiguous droughts. Currently, and since the late 1980s, rainfall amounts tend to catch up with the pre-1970 levels. However, this improvement seems to occur through increased rainfall intensities but the duration of the rainy season did not significantly change since the 1970s and the 1980s. On the other hand, the Sahelian population has tripled since 1950 and it is foreseen to be multiplied by 10 by the second half of the 21<sup>st</sup> century. Increasing urban population levels are still much more impressive and cause profound environmental degradation. Such an increasing human pressure leads to uncontrolled deforestation in order to satisfy the needs in fuel and construction wood and to make place for shifting cultivation. In addition, larger and larger herds occupying contracting pasture areas leads to overgrazing and trampling. All these processes provoke the degradation of the vegetation cover, a constant diminution of crop yields, and a strong reduction of the biodiversity. This article provides a state of the art of recent findings and controversy that surround the desertification processes. We conclude that, if the droughts of the 1970s and 1980s have had dramatic consequences for the population of the Sahel, the future very high human pressure on the environment will most likely enhance the desertification of the southern fringe of the Sahara, especially in the case of the alarming climate change scenarios forecasting rainfall decrease all over the Sahel.*

## Keywords

*Sahel, desertification, drought, climate change*

## 1. INTRODUCTION

La désertification est actuellement considérée comme l'une des problématiques environnementales les plus

préoccupantes du 21<sup>e</sup> siècle (World Bank, 2003). Suite au Sommet de la Terre de Rio en 1992, la communauté internationale s'est dotée d'un instrument juridique pouvant apporter une réponse globale à la probléma-

tique de la désertification. C'est ainsi que, en 1994, la Convention des Nations Unies de Lutte contre la Désertification (CNULD) a vu le jour.

La désertification est définie par la CNULD comme la «dégradation 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». Ces activités humaines sont principalement l'extension des zones agricoles, les activités d'élevage (surpâturage) et le déboisement, le tout amplifié par la pauvreté socio-économique des sociétés touchées exacerbant leur faible capacité de répondre aux défis environnementaux (Geist et Lambin, 2004). La dégradation des terres est à son tour définie comme «la diminution ou la 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 économiques des sols, et (iii) la disparition à long terme de la végétation naturelle». Quant aux zones dites arides, semi-arides et subhumides sèches, elles représentent «les zones, à l'exclusion des zones arctiques et subarctiques, dans lesquelles le rapport entre les précipitations annuelles et l'évapotranspiration potentielle se situe dans une fourchette allant de 0,05 à 0,65» (United Nations, 1994).

Compte tenu de ces définitions, la désertification menace 34 % des terres de la planète ainsi que les moyens de subsistance de près du tiers de la population mondiale en 2000, soit approximativement deux milliards d'individus (MEA, 2005). Les estimations des pertes financières mondiales dues à la désertification sont colossales, de l'ordre de 42 milliards de dollars par an, dont près du tiers sur le continent africain (Dregne et Chou, 1992).

Mais qu'en est-il des zones réellement touchées ? C'est là que réside toute la difficulté en l'absence d'indicateurs d'état et de suivi, tant globaux que locaux, scientifiquement robustes et pertinents. La dernière tentative réalisée dans le cadre du rapport de l'Évaluation des Écosystèmes pour le Millénaire (Millennium Ecosystem Assessment) estime que les zones totales affectées par la désertification sont de l'ordre de 12 à 24 % des zones arides, semi-arides et subhumides sèches, soit 600 à 1200 millions d'hectares (MEA, 2005). Les études réalisées par le passé en sont arrivées à de multiples conclusions variant de 12 % (MEA, 2005) à 20 % (Oldeman *et al.*, 1991) et 70 % (Dregne et Chou, 1992) des zones arides, semi-arides et subhumides sèches.

Dans le cadre de cet article, nous tenterons d'une part de répondre à la question de savoir si la désertification au Sahel est une crise climatique ou anthropique. D'autre part, nous reviendrons sur les tendances des processus

de dégradation environnementale en milieu aride : sont-elles sur le déclin, comme l'affirme un courant actuel, ou les efforts de ces dernières décennies en matière de lutte contre la désertification restent-ils été vains ?

## 2. LA REGION SAHELIENNE

Les limites du Sahel correspondent à des moyennes pluviométriques annuelles. La limite septentrionale est constituée par l'isohyète de 150 mm correspondant à la limite nord du cram-cram (*Cenchrus biflorus*) (Quézel, 1965). Cette zone fait l'objet de pâturages extensifs, de parcours, et donc d'une économie essentiellement pastorale. Au nord, sous les 150 mm, débute le Sahara et l'absence ou la très faible extension de la couverture végétale favorisent le développement de dunes vives. Si les précipitations annuelles de 700 mm limitent le Sahel vers le sud et le séparent, arbitrairement, du climat soudanais ; par contre, au sein du Sahel, la limite de 300 mm est de la plus haute importance car elle correspond à la limite septentrionale de la culture du petit mil (*Pennisetum typhoides*) (Verheyne, 1990). Le secteur entre 300 mm et 700 mm est donc caractérisé par une agriculture pluviale et par une population sédentaire. Les récentes modifications dans le régime des précipitations entraînent des variations temporaires de ces limites et engendrent des problèmes sociaux et environnementaux considérables (Ozer et Ericum, 1995; Lebel et Ali, 2009).

Si les limites du Sahel se sont modifiées ces dernières décennies, la limite Sahel-Sahara a également été sujette à de multiples fluctuations au cours des derniers millénaires. En effet, la présence de dunes aujourd'hui fixées par la végétation et datées de l'Ogolien prouve que lors du dernier interpluvial (18 ka), le Sahara s'étendait jusqu'à plus de 500 kilomètres plus au sud que sa limite actuelle (Goudie, 1996). Par contre, si on en croit des dépôts lacustres datant du début de l'Holocène (7-8 ka), le Sahara débutait à cette époque ~500 km plus au nord qu'aujourd'hui (Petit-Maire, 1994). L'aridification des régions au sud du Sahara se serait accélérée durant ces 6000 dernières années (Kröpelin *et al.*, 2008). Ces fluctuations récentes sur ~1000 km de la position de la bordure sud du Sahara ne sont pas toutes expliquées, mais il est vraisemblable que l'influence anthropique était alors négligeable. L'expansion du Sahara devrait s'accélérer durant le 21<sup>e</sup> siècle à cause, notamment, du réchauffement climatique (Zeng et Yoon, 2009).

Pour des raisons de disponibilité des données (principalement à l'échelle nationale), notre zone d'étude réfèrera –sauf mention contraire– au Sénégal, à la Mauritanie, au Mali, au Burkina Faso et au Niger.

## 3. EVOLUTION PLUVIOMETRIQUE AU SAHEL

### 3.1. Pluviométrie annuelle

La littérature commentant les fluctuations pluviométriques en Afrique de l'Ouest est abondante (Sircoulon,

1976; Nicholson, 2005; Morel, 1998). L'intérêt particulier suscité par cette région spécifique s'explique par le fait qu'elle a connu le déficit pluviométrique le plus important jamais enregistré au cours du 20<sup>e</sup> siècle, tant dans son intensité que dans sa durée (Jones et Hulme, 1996; Lebel et Ali, 2009).

La région sahélienne a toujours connu une alternance de périodes humides et sèches (Nicholson, 1978). Au cours du 20<sup>e</sup> siècle, trois périodes d'intense sécheresse ont affecté le Sahel. Il s'agit des sécheresses des années 1910, des années 1940 et de la «grande sécheresse» qui a débuté en 1968.

La sécheresse des années 1910 a été extrêmement marquée et étendue à toute la zone sahélienne de 1910 à 1916, le déficit pluviométrique culminant en 1913 (Sir-coulon, 1976 ; Vannitsem et Demarée, 1991). Malheureusement, peu de données pluviométriques témoignent de cette première sécheresse. Par contre, ces années sont restées gravées dans la tradition orale des populations locales (Karimoune, 1994) sous les noms de «*Tas-bane*» (peul), «*Gande Beeri*» (Zarma) ou «*Ize-Neere*»

(Zarma) qui signifient respectivement les «années calamiteuses», la «plus grande famine de l'histoire» et la «vente des enfants» (les enfants s'échangeaient contre le mil). Cette sécheresse aurait été la plus forte enregistrée au Sahel au moins depuis 1850 (Nicholson, 1978). Pour les deux sécheresses suivantes, un nombre suffisant d'informations pluviométriques est disponible. Avant de les décrire, l'évolution annuelle des précipitations au Niger est présentée entre 1921 et 2007.

Etant donné leur forte hétérogénéité spatiale, Lamb (1982) a proposé une analyse régionalisée des précipitations sur base d'un indice d'anomalie pluviométrique. Cet indice est calculé suivant l'équation:

$$X_j = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} \frac{r_j - \bar{r}_i}{s_i} \quad (\text{éq. 1})$$

où  $r_{ij}$  est la pluie mesurée en une année  $j$  à une station  $i$ ,  $\bar{r}_i$  et  $s_i$  sont les moyenne et écart-type des précipitations enregistrées à la station  $i$  et  $N_j$  est le nombre de stations présentant des valeurs pour l'année  $j$ .

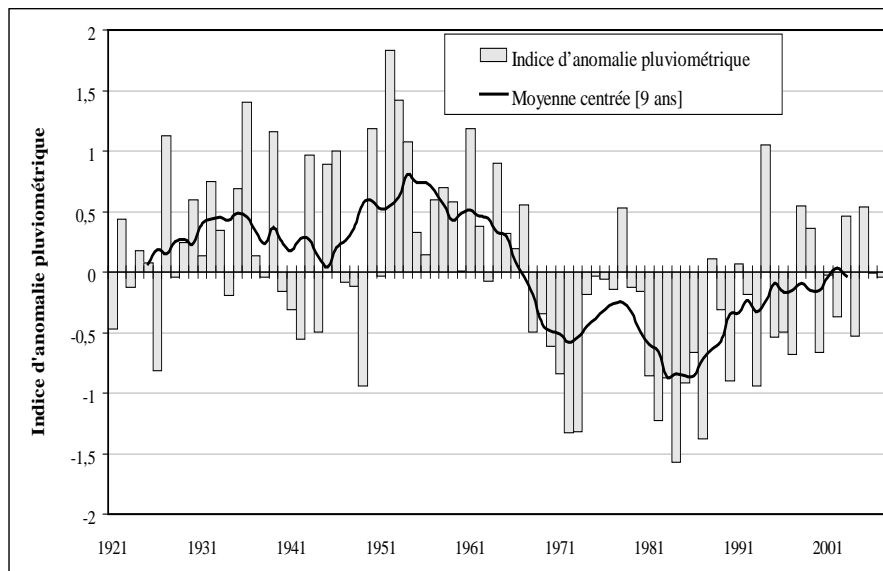


Figure 1 . Evolution des précipitations au Niger de 1921 à 2007 exprimée en fonction de l'indice d'anomalie pluviométrique calculé sur 20 stations (d'après la méthode de Lamb, 1982).

La représentation graphique de l'évolution des précipitations en région sahélienne obtenue par l'application de cette formule est présentée à la figure 1. Ce diagramme est basé sur les pluies annuelles de 20 stations au Niger dont la pluviosité moyenne annuelle est comprise entre 100 et 700 mm. L'indice n'est calculé qu'à partir de 1921 car nous ne disposons pas d'informations continues pour les stations de Zinder et Niamey pour la période 1905-1920.

Dans le but de rendre ce graphique plus facilement compréhensible et de représenter les écarts en termes de hauteur de précipitations, l'écart-type a été converti en millimètres en 'dé-normalisant' l'équation 1 de la manière suivante (Jones et Hulme, 1996), aboutissant à la figure 2:

$$P_j = X_j \bar{S} + \bar{P} \quad (\text{éq. 2})$$

où  $P_j$  est la pluviométrie régionale exprimée en mm en une année  $j$ ,  $\bar{S}$  est l'écart-type moyen des séries pluviométriques et  $\bar{P}$  est la moyenne pluviométrique régionale.

L'analyse de la figure 1 met en évidence le fait que la sécheresse des années 1940 n'a été marquée que par une succession d'années plus sèches que la moyenne 1921-2007 alternant avec des années fortement arrosées. La moyenne centrée sur neuf ans (Fig. 1) ne passe d'ailleurs pas sous la moyenne 1921-2007 et seul le déficit de l'année 1949 est remarquable, sans toutefois s'écarter de plus d'un écart-type de la moyenne. Deux

raisons expliquent ceci : (i) les déficits pluviométriques ne sont pas répartis de manière uniforme durant cette période (Ozer et Erpicum, 1995) et leur poids est donc atténué dans la moyenne régionale et (ii) la sécheresse n'a été durement ressentie que dans l'extrême ouest sahélien (Vannitsem et Demarée, 1991), non considéré sur la figure 1.

Quant à la «grande sécheresse», elle apparaît clairement sur la figure 1 comme étant globale et rapide. Une rupture climatique s'est produite à la fin des années 1960. En effet, dès 1968, la moyenne centrée sur neuf ans plonge sous la moyenne 1921-2007. De 1921 à 1967, 68% des années connaissent une pluviométrie excédentaire par rapport à la moyenne 1921-2007, alors que 80% des années comprises dans la période 1968-2007 enregistrent des précipitations déficitaires. De 1921 à 1967, huit années sont fortement excédentaires ( $> \text{moyenne} + 1\sigma$ ) alors qu'aucune n'est fortement déficitaire ( $< \text{moyenne} - 1\sigma$ ). A l'inverse, au cours des 40 dernières années analysées, cinq années ont été fortement déficitaires alors qu'une seule a été fortement excédentaire.

A partir des données obtenues pour le Niger (fig. 1 et 2), il est possible de mettre en évidence la non-stationnarité des séries pluviométriques au cours de la pé-

riode 1921-2007 et d'isoler les périodes d'anomalies pluviométriques (périodes fortement pluvieuses ou de sécheresse). Pour ce faire, le test non-paramétrique de Pettitt (1979), capable d'estimer la position d'un changement de moyenne (point de rupture) dans une série, a été appliqué à ces données. Un point principal de rupture est identifié en 1967 ( $p < 0,0001$ ), mettant en évidence le déficit pluviométrique de ces 40 dernières années. Ce résultat est en accord avec les conclusions des travaux antérieurs relatifs à l'analyse, station par station, des séries pluviométriques sahéliennes (Vannitsem et Demarée, 1991 ; Morel, 1998). Au Niger, la comparaison des moyennes des sous-séries pluviométriques homogènes avant et après le point de rupture de 1967 montre l'ampleur de la transition brutale qui caractérise la «grande sécheresse» (fig. 2). Près de 100 mm séparent les périodes 1921-1967 et 1968-2007, dont les pluviométries moyennes sont respectivement de 514 mm et 417 mm, soit une diminution de la pluviométrie de 19% à partir de 1968. Notons que le changement pluviométrique est encore accentué par le fait que les années 1950 constituèrent la décennie la plus arrosée du 20<sup>e</sup> siècle (fig. 2). En effet, plus de 220 mm séparent les valeurs extrêmes de la moyenne des années 1950 et des années 1980.

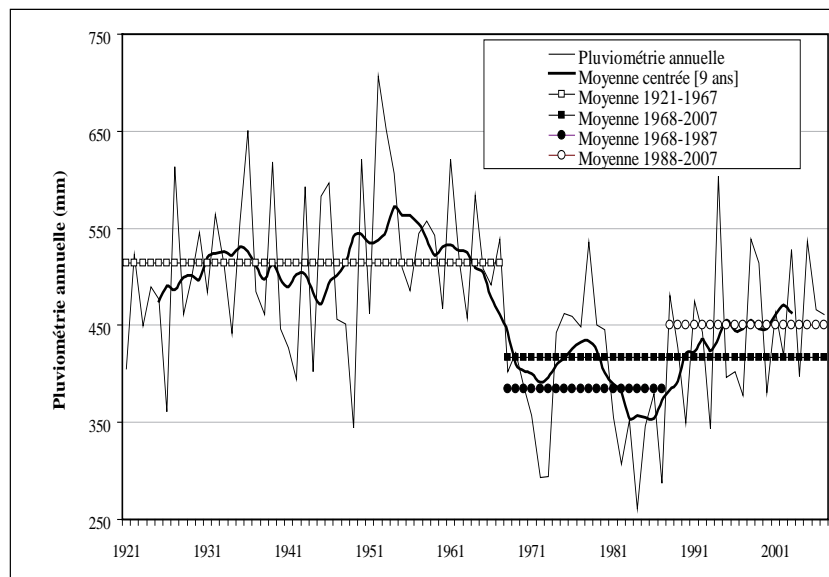


Figure 2. Précipitations annuelles au Niger (d'après la méthode de Jones et Hulme, 1996), moyennes des sous-séries pluviométriques avant et après le point de rupture de 1967, ainsi que pour les sous-séries 1968-1987 et 1988-2007 (données provenant de 20 stations).

Cette rupture de tendance généralisée s'est progressivement bien plus marquée au sud jusqu'à approximativement 10°N de latitude (Morel, 1998 ; Paturol *et al.*, 1998 ; Tarhule et Woo, 1998). Au sud de cette latitude, toutes les stations n'ont pas été touchées de manière similaire. Selon Morel (1998), cette rupture de tendance serait apparue progressivement suivant deux axes : du nord vers le sud et de l'ouest vers l'est. Ainsi, en Afrique de l'Ouest, c'est la partie nord-ouest (20°N, 18°W)

qui aurait été globalement touchée dès 1968 avant d'atteindre la partie sud-est (5°N, 30°E) en 1974.

L'application du test de Pettitt (1979) aux sous-séries 1921-1967 et 1968-2007 détecte une autre rupture significative au sein de la période récente. En effet, comme présenté à la figure 2, la «grande sécheresse» s'est, statistiquement, terminée en 1987 ( $p = 0,02$ ) et fut suivie d'un regain de l'activité pluviométrique ces 20 dernières années. Près de 70 mm séparent les moyennes pluviomé-

triques des périodes 1968-1987 (384 mm) et 1988-2007 (450 mm), soit une augmentation de 17 %. Par ailleurs, l'analyse de la figure 1 montre que les années déficitaires enregistrées depuis 1988 ne s'écartent jamais de plus de  $1\sigma$  de la moyenne (ce qui se passa par contre cinq fois durant les décennies 1970 et 1980), et qu'elles sont souvent contrebalancées par des années de pluviométrie excédentaire (alors qu'une seule année supérieure à la moyenne fut observée entre 1968 et 1987). Il convient cependant de tempérer cette récente rupture car la pluviométrie moyenne des deux dernières décennies reste toujours largement inférieure (64 mm de moins) à celle d'avant 1968.

Ces résultats confirment les conclusions d'Ozer *et al.* (2003), suggérant que la sécheresse sahélienne aurait pu se terminer durant les années 1990. L'analyse de cette même série pluviométrique nigérienne arrêtée en 2004 n'avait pas pu détecter de rupture, mais bien une «ébauche de rupture» ( $p = 0,17$ ), ce qui correspond à

une rupture peu significative ( $0,05 < p < 0,20$ ) en 1987, selon la classification de Paturel *et al.* (1998)» (Ozer *et al.*, 2005).

Il faut aussi souligner que la situation pluviométrique au Niger ne peut en aucun cas être généralisée à l'ensemble de la région sahélienne. En effet, si de plus en plus d'auteurs ont constaté que la pluviométrie s'était véritablement améliorée durant les années 1990 (Dai *et al.*, 2004 ; Nicholson, 2005 ; Hountondji *et al.*, 2009), jamais une rupture nette n'a pu être mise en évidence en considérant toute la région sahélienne. La figure 3 montre d'ailleurs la position géographique des isohyètes de 300, 500 et 700 mm en Afrique de l'Ouest à diverses époques. On remarque clairement que, si la situation s'améliore depuis 1990 au Niger avec une récente migration des isohyètes vers le nord, il n'en est rien au niveau de la Mauritanie, du Sénégal et du Mali occidental où les isohyètes de 1970-1989 se superposent à celles de 1990-2007.

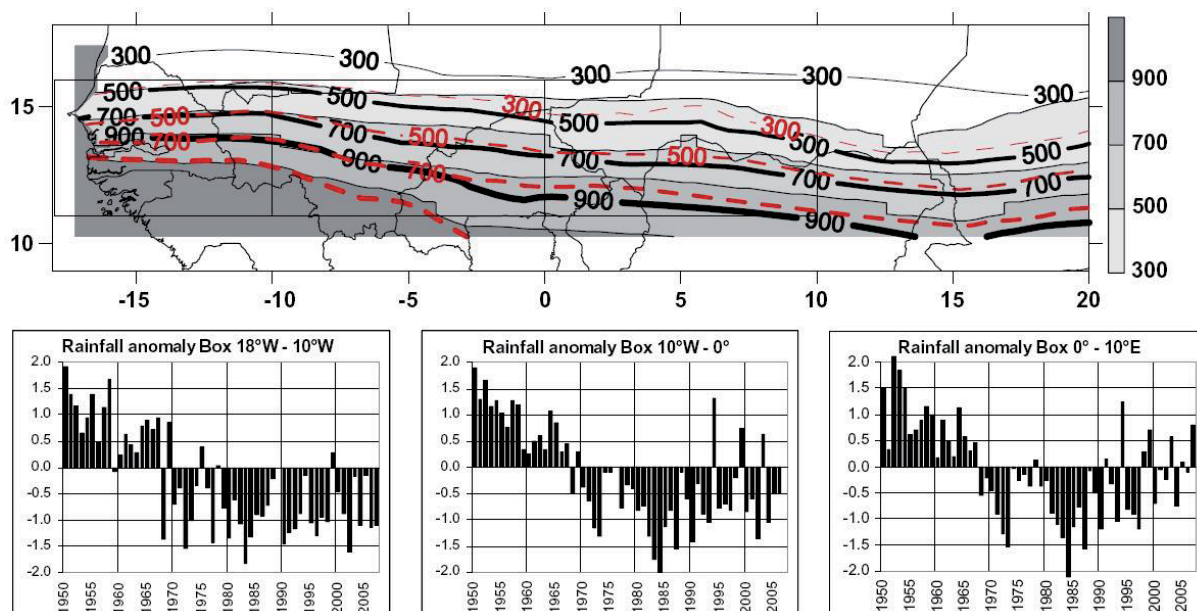


Figure 3. Position moyenne des courbes isohyètes durant trois périodes. Les isohyètes de la période la plus récente (1990-2007) sont représentées en surfaces grisées (échelle à droite) ; les isohyètes de la période « humide » (1950-1969) sont représentées en par les lignes noires continues ; et les isohyètes de la « grande sécheresse » (1970-1989) sont représentées par les lignes rouges discontinues. Sous la carte, les évolutions des précipitations en Afrique de l'Ouest de 1950 à 2007 exprimées en fonction de l'indice d'anomalie pluviométrique pour trois zones de 10° de longitude (entre 11°N et 16°N) d'ouest en est (d'après Lebel *et al.* 2009).

### 3.2. Longueur de la saison des pluies

Si la rupture climatique de 1968 se marque particulièrement bien dans les totaux pluviométriques annuels, elle se traduit également par une réduction de la longueur de la saison des pluies (Ozer *et al.*, 1995; Daouda *et al.*, 1998), entraînant donc automatiquement une diminution des possibilités de production céréalière dans les régions les plus fragiles. A titre d'exemple, Daouda *et al.* (1998) ont montré que les stations de la zone sahélienne pastorale du Niger ont vu la disparition pure et simple de leur saison des pluies durant la période 1968-1985 alors que les autres stations, qui accusaient

un déficit pluviométrique globalement équivalent à 30 %, ont été confrontées à une diminution de la longueur de la saison des pluies de plus de 40 %. Le plus inquiétant est l'évolution de la longueur de la saison des pluies consécutive à la récente amélioration pluviométrique relative. En effet, dans l'est du Niger, Ozer *et al.* (2005) ont démontré que la longueur de la saison des pluies était restée inchangée entre les périodes 1968-1987 et 1988-2003 malgré un retour à une pluviométrie annuelle plus abondante. Frappart *et al.* (2009) dressent le même constat entre 1950 et 2007 dans le Gourma malien où la contraction de la saison des pluies s'est amplifiée dans les années 2000, malgré une pluviomé-

trie plus généreuse.

### 3.3. Événements pluvieux

La longueur de la saison des pluies est conditionnée par le nombre de jours de pluie et leur répartition dans le temps. Or, il s'avère que le nombre de jours de pluie a également été dramatiquement modifié approximativement dès 1968 (Tarhule et Woo, 1998 ; Frappart *et al.* 2009) et que, comme le montrent la figure 4 et le tableau 1 pour la station de Niamey (Niger) durant la période 1940-2002, l'amélioration récente de la pluviométrie annuelle s'est accompagnée d'une diminution significative et constante du nombre de jours de pluie (-3 % par décennie,  $p < 0,001$ ) et d'une augmentation notable de l'intensité pluviométrique moyenne par jour de pluie (+3,9 % par décennie,  $p < 0,05$ ). Pour la station de Niamey, l'amélioration récente de la pluviométrie annuelle est donc due essentiellement à l'augmentation des événements pluvieux quotidiens de forte intensité. Ainsi, en reprenant la terminologie adoptée par Groisman *et al.* (2005), les événements intenses (> 90<sup>e</sup> percentile), très intenses (> 95<sup>e</sup> percentile) et extrêmes (> 99<sup>e</sup> percentile) ont tous augmenté au cours de la période

1940-2002. Cette augmentation caractérise surtout les 15 dernières années (tableau 1), pendant lesquelles les événements intenses et extrêmes ont connu une fréquence de 5,3 et 0,8 jours par an, contre une moyenne de 4,1 et 0,4 jours par an durant la période 1940-2002. Aussi, en retenant arbitrairement le seuil de 100 mm comme pluie quotidienne très exceptionnelle, il apparaît que cinq événements de cette nature ont été enregistrés à Niamey entre 1940 et 2002, dont quatre depuis 1989. Ici encore, une analyse est en cours pour déterminer si les conclusions obtenues pour Niamey peuvent être généralisées à l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest sahélienne, mais force est de constater que ces résultats préliminaires sont en accord avec les conclusions du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat (GIEC) selon lequel «les précipitations extrêmes devraient augmenter plus que la moyenne annuelle et l'intensité des événements pluvieux est supposée augmenter» (Houghton *et al.*, 2001). En outre, plusieurs auteurs ont observé une augmentation importante du nombre d'inondations depuis la fin des années 1980 dues, il est vrai, essentiellement à l'augmentation de la vulnérabilité des zones urbaines (Sene et Ozer, 2002 ; Tarhule, 2005).

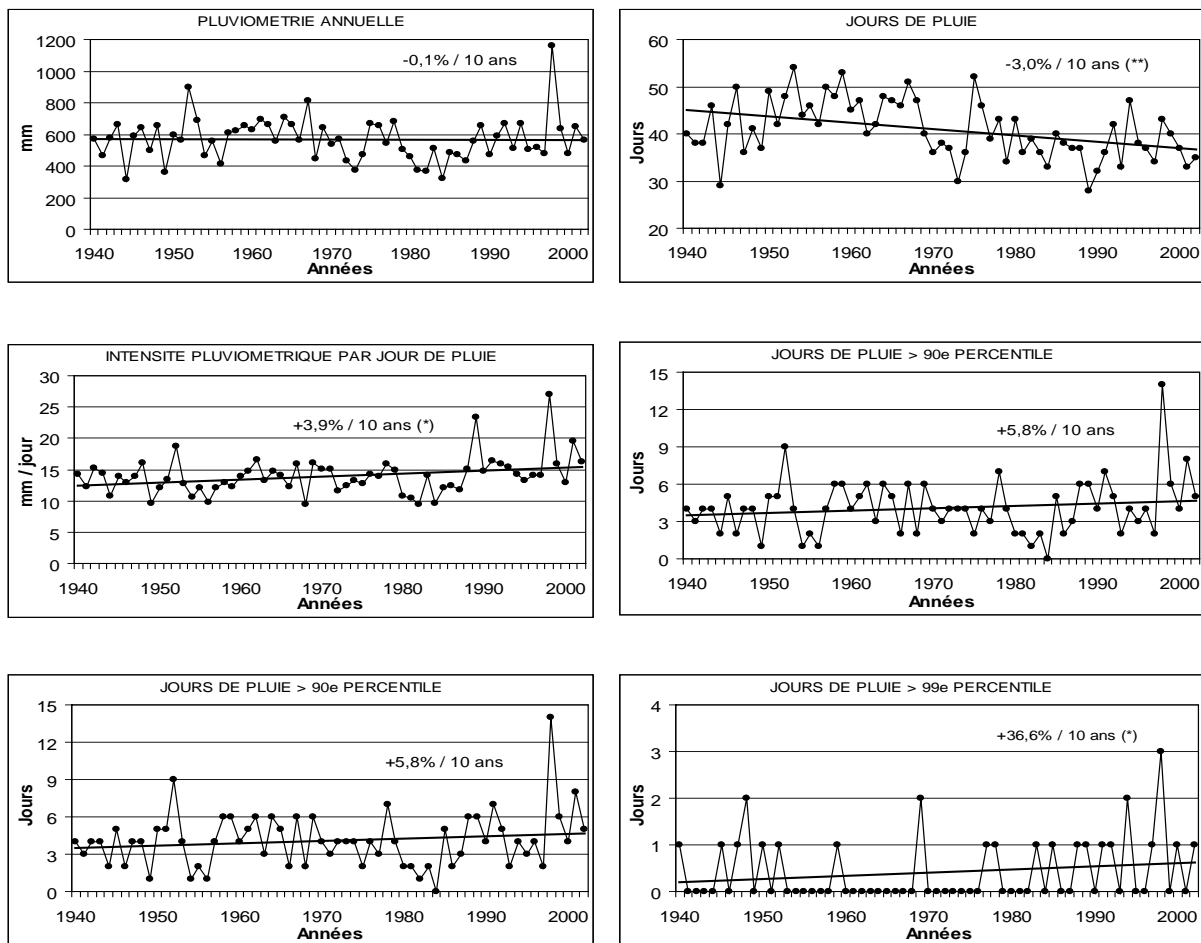


Figure 4. Tendances de la pluviométrie annuelle, du nombre de jours de pluie, de l'intensité pluviométrique moyenne par jour de pluie, et du nombre de jours de pluie supérieurs aux 90<sup>e</sup>, 95<sup>e</sup> et 99<sup>e</sup> percentiles à Niamey (Niger) de 1940 à 2002. Les tendances significatives ( $p < 0,05$ ) et très significatives ( $p < 0,01$ ) sont indiquées respectivement par (\*) et (\*\*). (Ozer et Ozer, 2005).

Tableau 1. Comparaison des valeurs moyennes obtenues pour la pluviométrie annuelle (mm), le nombre de jours de pluie (jours), l'intensité pluviométrique moyenne par jour de pluie (mm/jour), et le nombre de jours de pluie supérieurs aux 90<sup>e</sup> et 99<sup>e</sup> percentiles (jours) à Niamey (Niger) durant diverses périodes sélectionnées.

Station de Niamey	1940-2002	1940-1967	1968-1987	1988-2002
Pluviométrie annuelle	567,9	596,5	498,2	607,7
Jours de pluie	40,8	44,3	39,0	36,8
Intensité pluviométrique moyenne	14,0	13,4	12,8	16,6
Jours de pluie > 90 <sup>e</sup> p	4,1	4,0	3,2	5,3
Jours de pluie > 99 <sup>e</sup> p	0,41	0,29	0,30	0,80

#### 4. EVOLUTION ANTHROPIQUE

##### 4.1. La croissance démographique

La population sahélienne connaît une des croissances démographiques les plus élevées au monde. Depuis 1950, la population totale a été multipliée par quatre (fig. 5). Selon les Nations Unies (UNPP, 2009), la population sahélienne devrait encore doubler au cours des 25 prochaines années (2010-2035) et dépasser les 187 millions d'habitants en 2050, soit près de douze fois plus qu'en 1950 (16 millions). On compte actuellement une augmentation de la population dépassant les deux millions d'individus par an dans notre zone d'étude. A titre de comparaison, sur la même période, la population mondiale devrait être multipliée par 3,6 et la population du continent africain par 8,6.

L'extrême pauvreté de cette population la rend très vulnérable aux modifications climatiques. En effet, sur l'ensemble des pays sahéliens, la production céréalière totale par habitant s'est dégradée avec le temps (Ozer et Ozer, 2005), ce qui rend les populations sahéliennes toujours plus vulnérables aux caprices de la nature. Etant donné la croissance démographique projetée, on est en droit de se demander si le pire n'est pas à venir. Car, en outre, le problème de la faim au Sahel n'est plus conjoncturel mais devient progressivement structurel. Le tableau 2 synthétise, pays par pays, l'évolution démographique, la proportion de la population vivant avec moins de 2 US\$ par jour, et le nombre d'individus

souffrant de sous-alimentation durant diverses périodes. Il apparaît que 74 % de la population sahélienne actuelle vit avec moins de 2 US\$ (1,4 EUR) par jour et que 17 % des sahéliens sont sous-alimentés alors même que les précipitations sont «normales». En effet, la période 1990-1992 a été beaucoup moins généreuse en précipitations que la période 2004-2006. Pourtant, le nombre de sous-alimentés s'est accru de 1,3 million d'individus.

Plus impressionnante encore est l'augmentation des populations s'agglutinant dans les grandes villes sahéliennes, essentiellement les capitales. A titre d'exemple, Nouakchott, la capitale de la Mauritanie, dépasse largement le million d'habitants et abrite actuellement près de 40% la population mauritanienne. Mais cette capitale ne comptait que 558 195 habitants en 2000, 138 530 en 1977 et 6000 seulement en 1962 (WWW1, Salama *et al.*, 1991), et elle n'était considérée en 1951 que comme un «poste» abritant quelques dizaines d'habitations (Duchemin, 1951). Ainsi, en réponse à la sécheresse, la population urbaine a été multipliée par plus de 100 entre 1950 et 2005 en Mauritanie où, il y a moins de quarante ans, la population nomade représentait plus de 95% de la population totale. Il n'est dès lors pas étonnant que la proportion de la population urbaine vivant dans des bidonvilles varie de 38% au Sénégal à 83% au Niger (Nations Unies, 2010).

La population urbaine des pays du Sahel concernés par cette étude a été multipliée par 13,5 depuis 1950. Cette explosion démographique urbaine est due en grande part à l'exode rural massif de «réfugiés environnementaux», ou «victimes de la désertification», un constat qui est loin d'être neuf (par exemple Krings, 1986) et tend à prendre une ampleur préoccupante (voir discussion). En 2030, la population urbaine du Sahel devrait presque être égale à sa population rurale. Cette évolution est remarquable quand on sait que la population urbaine représentait bien moins de 10% de la population sahélienne totale en 1950.

Cette augmentation préoccupante des populations urbaines du Sahel participe aux bouleversements environnementaux que connaissent les zones périphériques de ces agglomérations. En effet, les nouveaux habitants doivent construire leur logement, cuire leurs aliments, boire, se laver, etc, ce qui demande d'énormes ressour-

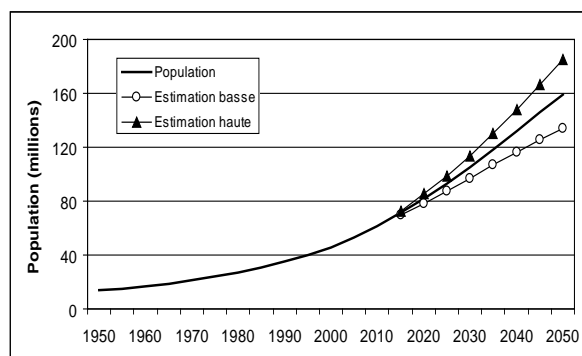


Figure 5. Evolution de la population sahélienne de 1950 à 2005 et projections (avec marges d'incertitude) pour la période 2005-2050 (d'après les données de l'UNPP, 2009).

Tableau 2. Indicateurs socio-économiques des pays sahéliens de l'Afrique de l'Ouest.

Indicateur	Sénégal	Mauritanie	Burkina Faso	Mali	Niger
Population totale (millions) en 1980 ‡	5,6	1,5	6,9	7,2	5,9
Population totale (millions) en 2010 ‡	12,9	3,4	16,3	13,3	15,9
Population totale (millions) en 2050 ‡	26,1	6,1	40,8	28,3	58,2
Population avec moins de 2 US\$/jour (%) †	56	63	81	72	86
Population sous-alimentée (%) en 1990-1992 *	28	10	14	14	38
Population sous-alimentée (%) en 2004-2006 *	25	8	9	10	28
Population sous-alimentée (millions) en 1990-1992 *	2,3	0,2	1,3	1,1	3,1
Population sous-alimentée (millions) en 2004-2006 *	2,9	0,2	1,3	1,1	3,8

Sources : ‡ FAO (2010) ; † Données les plus récentes (2003-2008), Bost *et al.* (2009) ; \* FAO (2009).

ces en eau, en énergie et en matières premières. Ainsi, on estime que la consommation d'eau atteint environ 140 litres par jour et par personne dans les centres urbains contre 15 litres seulement en zone rurale. Ceci implique évidemment une politique rigide de la gestion de l'eau dont l'application est rendue extrêmement difficile par le manque de moyens financiers et par l'augmentation continue de la demande (Bechler-Carmaux *et al.*, 1999). Ensuite, la demande en bois-énergie, et plus spécifiquement en charbon de bois, crée des auréoles de déboisement autour des villes et le long des axes routiers reliant les agglomérations. Finalement, l'afflux continu de ces réfugiés environnementaux dans les zones urbaines entraîne une augmentation dramatique de la vulnérabilité de ces nouveaux arrivants face aux maladies et aux risques naturels. En effet, de nouveaux quartiers spontanés nés des grandes migrations consécutives à la vague de sécheresse des années 1980 se sont installés dans des dépressions jadis marécageuses où les eaux de pluie ne peuvent s'évacuer en l'absence de plan d'urbanisme et de réseau d'assainissement des eaux usées. C'est le cas par exemple à Dakar, Saint-Louis ou encore Nouakchott, qui connaissent de dramatiques inondations dès que tombe une pluie dont la période de retour est supérieure à 6 ans (Sene et Ozer, 2002). A Niamey, l'insuffisance, voire l'absence, d'infrastructures d'assainissement et de collecte des ordures ménagères est à l'origine de la contamination par des matières organiques d'origines humaine et animale des eaux des nappes superficielles accessibles par les puits. Cette pollution constitue un risque sanitaire important pour une majorité des habitants de la capitale du Niger (Chippaux *et al.*, 2002).

#### 4.2. Le déboisement

Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation (FAO), l'Afrique se distingue par le taux de déboisement continental le plus important de

la planète, estimé à 0,78 % par an. L'Afrique sahélo-soudanienne occidentale (Mauritanie, Sénégal, Guinée Bissau, Mali, Burkina Faso, Niger et Tchad), pourtant caractérisée par des ressources forestières limitées, faisait légèrement mieux que le continent avec un recul annuel de 0,72 % (FAO 2001). Cependant, force est de constater que les informations objectives relatives à l'évolution des ressources forestières sont très rares en Afrique de l'Ouest (Ozer, 2004) et ailleurs dans le monde (Lepers *et al.*, 2005). Or, les forêts tropicales sèches sont considérées comme un écosystème à très haut risque (Chamard et Courel, 1999) et la problématique du déboisement est extrêmement importante dans les régions arides, semi-arides et subhumides sèches car elle contribue à l'avancée de la désertification (Ozer, 2000 ; Geist et Lambin, 2004).

A partir d'une analyse exhaustive de la littérature, Ariori et Ozer (2006) ont dégagé les tendances de changement des paysages forestiers en Afrique de l'Ouest aride, semi-aride et subhumide sèche. Il ressort de leur étude que la vitesse annuelle moyenne de changement des unités paysagères forestières est de -2 % au cours des dernières décennies. Des 44 sites forestiers analysés, 15 ont disparu durant la deuxième moitié du 20<sup>e</sup> siècle, et tous les autres ont enregistré une diminution de plus de 50 % de leur superficie. Un exemple frappant est l'évolution des 27 forêts classées et protégées situées le long du fleuve Sénégal qui ont vu leur superficie diminuer de 77 % au Sénégal de 1965 à 1992 (Tappan *et al.*, 2004), notamment suite à la conversion de ces forêts en rizières (Niang *et al.*, 2008).

Ce déboisement continu a fortement réduit la richesse floristique des espèces forestières. Au Sénégal, la biodiversité s'est ainsi réduite de plus de 30 % entre 1945 et 1993 (Gonzalez, 2001). Dans le Sahel, des inventaires réalisés dans 14 terroirs villageois de la Mauritanie au Tchad montrent que la richesse floristique des espèces forestières est restée stable dans deux terroirs et a diminué partout ailleurs jusqu'à 57 % (Gonzalez *et al.*,



2004). Sur un total de 123 espèces ligneuses répertoriées dans le Sahel par Wezel (2004), 20 ont disparu, 79 sont en déclin, 11 sont stables et 13 (dont 11 exotiques) ont progressé durant ces trente à cinquante dernières années.

Par ailleurs, les coupes abusives pour satisfaire les besoins en énergie des populations et la demande en bois d'œuvre (93 %), l'expansion agricole (89 %), le surpâturage (39 %), les feux de brousse (36 %) et la sécheresse (16 %) sont les cinq causes principales du déboisement citées par la littérature (Ariori et Ozer, 2006).

Dans la zone étudiée, le bois-énergie représentait 84,7% des besoins énergétiques de la population en 2002 (calculé d'après HDR, 2005). Cette proportion est considérable et largement supérieure à toute autre région de la planète. En effet, le bois-énergie constitue 75,9%, 70,6% et 7,6% des besoins énergétiques respectivement dans les pays les moins développés, l'Afrique sub-saharienne et la population mondiale (HDR, 2005). Les projets de diversification énergétique entrepris en Afrique sahélienne, trop coûteux ou menés sans le suivi approprié, n'ont que rarement atteint leurs objectifs (Odihi, 2003; Bugaje, 2006). A titre d'exemple, seulement 5% de la population malienne a accès à l'électricité, dont moins de 1% de la population rurale et à peine 25% de la population urbaine de Bamako, estimée à plus de 1,3 million d'habitants (Bugaje, 2006). Logiquement, c'est le bois qui reste la principale source d'énergie. Même si son prix augmente sans cesse (Odihi, 2003), il reste bien inférieur à celui des autres sources d'énergie et, surtout, le bois ne connaît pas de rupture d'approvisionnement. En outre, la consommation du charbon de bois, considéré comme plus moderne, plus pratique et plus adapté à l'habitat urbain, est de plus en plus importante au niveau des villes. Ainsi, le charbon de bois est devenu le premier combustible à Bamako dès 1997. Sa consommation est passée de 15,3 à 70 kt entre 1990 et 2000 (Touré, 2002). Ceci soulève une nouvelle problématique car, si le charbon de bois a un pouvoir calorifique à peu près double de celui du bois de chauffe, il faut approximativement entre 4 et 6 kg de bois pour obtenir 1 kg de charbon (Chamard et Courel, 1999). La carbonisation conduit donc à utiliser de plus en plus de bois. Dès lors, le commerce du bois est devenu une source complémentaire de revenus pour nombre d'agriculteurs depuis les années 1980 (Odihi, 2003; Ozer, 2004).

Souvent suggérées comme un des multiples indicateurs de désertification, les statistiques relatives à l'évolution des ressources forestières pourraient être utilisées dans notre zone d'étude. La FAO qui, avec l'aide de 800 experts, dirige l'action mondiale pour améliorer les connaissances sur les forêts du monde (FAO, 2005) est la seule source d'information disponible en Afrique de l'Ouest. La figure 6 présente les résultats obtenus par cette institution des Nations Unies de 1980 à 2005 et laisse perplexe. En effet, si la production de bois rond (utilisé à 90% comme bois-énergie) a augmenté

de manière constante de 63% entre 1980 et 2004, les superficies forestières publiées par la FAO sont restées inchangées entre 1980 et 2005 (FAO, 1993, 2006). Devant ce constat, il semble clair que ces données ne sont pas utilisables dans l'objectif de réaliser un suivi-évaluation de la désertification.

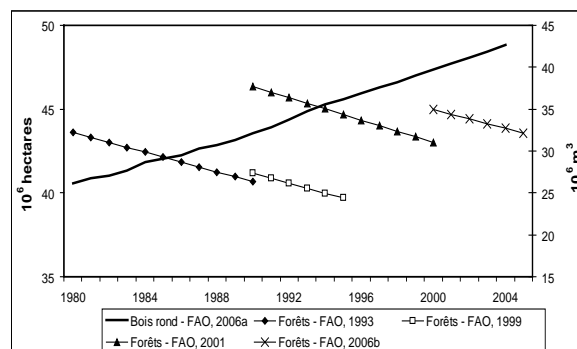


Figure 6. Evolution de la superficie forestière et de la production annuelle de bois rond dans la zone d'étude (Mauritanie, Sénégal, Guinée Bissau, Mali, Burkina Faso, Niger et Tchad), de 1980 à 2005, d'après les statistiques de la FAO (Ozer et Ozer, 2005).

### 4.3. Le (sur)pâturage

Conséquence directe de la croissance démographique humaine, on note une augmentation du cheptel dans toute la région. Ce développement du cheptel est lié à l'espérance des exploitants d'augmenter leurs revenus. Intervient aussi un aspect culturel qui veut que les individus les plus importants possèdent les troupeaux les plus prestigieux.

La figure 7 présente l'évolution du cheptel de 1961 à 2008 dans notre zone d'étude (d'après FAO, 2010). Il y apparaît que les bovins présentent une forte vulnérabilité durant les graves crises de sécheresse comme la période 1972-1974 où ce cheptel a perdu près d'un quart de sa population, passant de 20,1 à 15,5 millions de têtes. De même, en 1982, alors que la population bovine totale avait dépassé le niveau record de 1971, une autre crise aiguë de sécheresse engendra la perte de 5 millions de têtes de bétail (soit plus de 20 % du cheptel bovin) en quelques années. En 1986, la population bovine retombera à son niveau de 1961. Après cette date, et en l'absence de sécheresse extrême, un accroissement annuel moyen de 5,1 % est enregistré. En 2008, l'augmentation de la population bovine pour notre zone d'intérêt est de 123 % par rapport à 1961.

Les ovins et caprins présentent pour leur part une évolution parallèle. Moins vulnérables par rapport aux forts déficits pluviométriques, ils présentent respectivement une augmentation de 213 % et 226 % par rapport à 1961. L'évolution de ces vingt dernières années est déconcertante avec un accroissement annuel moyen de 5 % pour les ovins et de 4 % pour les caprins.

Cette augmentation considérable du troupeau, additionnée au fait que sa surface d'approvisionnement se soit

réduite lors de la longue sécheresse par aridification et par transformation de pâturages en zones de cultures, a des répercussions dramatiques sur l'environnement. Les ressources en pâturages alors encore disponibles se sont dégradées par surpâturage, le cheptel ne permettant plus la régénération de certaines pousses, qui laissent la place soit à des sols fortement à totalement dénudés, soit à un nouveau couvert de végétaux non consommables, à une prolifération d'espèces buissonnantes et non fourragères et à une augmentation des espèces annuelles éphémères (Mainguet, 1991). De ce fait, une fois que le sol se retrouve partiellement ou totalement dépourvu de couvert végétal, il est exposé à tous les types d'érosion, et spécialement à la déflation éolienne.

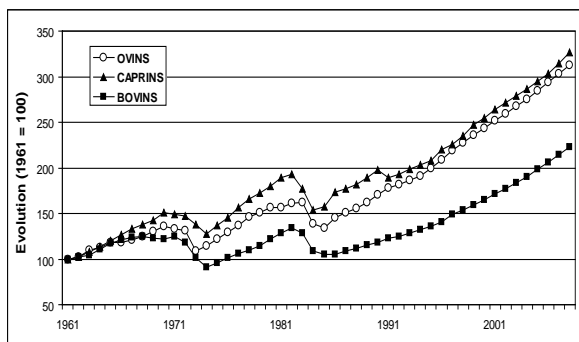


Figure 7 : Evolution proportionnelle du nombre de têtes de bétail dans la zone d'étude de 1961 à 2008 (1961 = 100) (d'après les données de la FAO, 2010). Bovins: 1961 = 17 10<sup>6</sup> ; ovins: 1961 = 16,3 10<sup>6</sup> ; caprins: 1961 = 13,7 10<sup>6</sup>.

Mais les arbres eux-mêmes ont fortement souffert de la pression démographique des animaux domestiques lors des sécheresses et en particulier les arbres à «fourrage» qui sont, en fin de saison sèche, en grand danger lorsque l'homme en quête de nourriture pour son troupeau taille parfois l'arbre entier, le tuant et rendant impossible la survie de l'espèce. L'exemple du *Terminalia avicenioides* dans la région de Maradi (Niger sahélien central) illustre bien cette pratique pastorale (Peyre de Fabrègues, 1990). Les caprins sont également friands des feuilles de certains arbres, ce qui représente un risque supplémentaire pour ces espèces arbustives.

Un autre effet néfaste du cheptel est le piétinement des sols. Cela peut empêcher la régénération de jeunes pousses et peut provoquer la remise en mouvement de certains sols jusqu'alors protégés de l'érosion éolienne grâce, par exemple, à des croûtes superficielles (Tricart, 1959).

Du surpâturage, il résulte une dégradation non seulement de la couverture végétale du sol mais également une forte réduction de la biodiversité (Laminou Manzo, 2010).

## 5. DISCUSSION

La désertification a toujours été controversée. Au début des années 1990, alors que Thomas (1993) prétendait qu'elle n'était qu'une «tempête de sable dans une tasse de thé», Mainguet (1991) martelait qu'elle constituait un processus «irréversible» dans bien des cas.

Plus récemment, et depuis le retour des précipitations



Figure 8. Installation monospécifique de *Leptadenia pyrotechnica* sur les sols sableux dégradés dans une zone couverte par une savane arborée, durant les années 1950 (Gouré, Niger oriental, février 2005). Photo O. Laminou Manzo.

à un niveau moins dramatique que celui observé durant les années 1970 et 1980, nombre de publications parlent de «désertification en recul» (Rasmussen *et al.*, 2001), s'interrogent sur le crédit à apporter aux proces-

sus de désertification (Niemeijer et Mazzucato, 2002), montrent un «reverdissement du Sahel» (Eklundh et Olsson, 2003), ou émettent des doutes sur l'interprétation des données satellitaires (Hein et De Ridder, 2006)

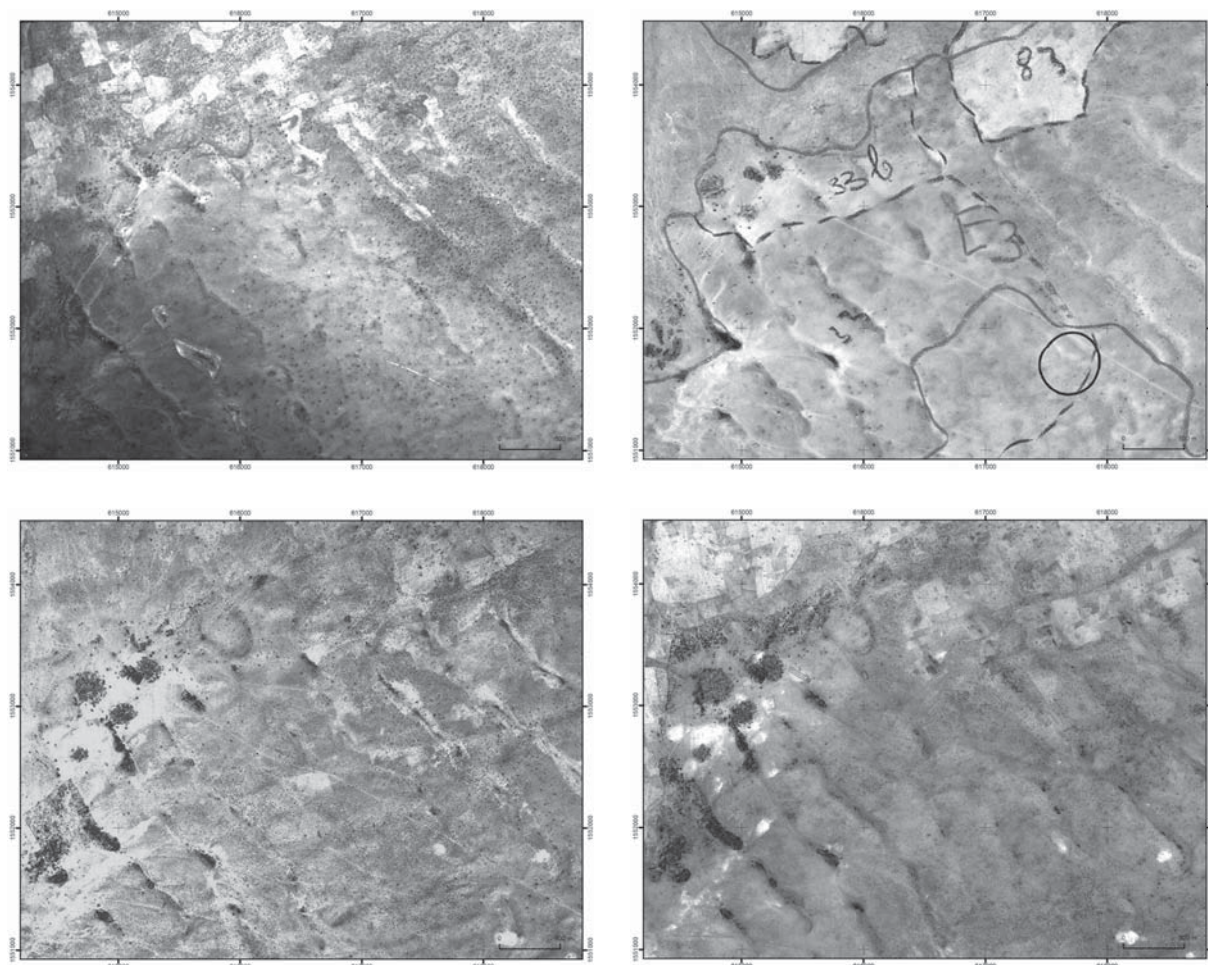


Figure 9. Evolution paysagère de la zone de Tchago (sud-est du Niger) de 1957 (IGN France, décembre 1957, en haut à gauche) à 2005 (Ikonos, 25 juillet 2005, en bas à droite). Situations intermédiaires (IGN Niger) en mars 1975 (en haut à droite) et décembre 1996 (en bas à gauche).

qui sont directement repris par d'autres scientifiques (Prince *et al.*, 2007). Ces études sont systématiquement utilisées tantôt par les sceptiques comme étant la preuve que la désertification n'est que conjoncturelle, tantôt par les responsables des Nations Unies comme une *success story* tangible de leurs actions de lutte contre la désertification. Ce débat prend une telle proportion que différents journaux organisent des numéros thématiques sur ce thème (Hutchinson *et al.*, 2005).

L'analyse de ces papiers montre que leurs arguments peuvent généralement être facilement réfutés. En effet, dans leur étude relative au nord du Burkina Faso, Rasmussen *et al.* (2001) ont par exemple suggéré sur base d'analyse diachronique de photographies aériennes et d'entretiens avec quelques éleveurs que la désertification était en recul depuis les années 1980. Ainsi, l'analyse des données aériennes montre que le *Leptadenia pyrotechnica* est venu recoloniser des sols totalement dénudés durant les années 1980, au plus fort de la grande sécheresse. Toutefois, les auteurs omettent de signaler que cette même zone était couverte par une savane arbustive ou arborée durant les années 1950 (Lindqvist et Tengberg, 1994). Le fait que le *Leptadenia pyrotech-*

*nica*, espèce typiquement saharienne (Arbonnier, 2002), recolonise de manière monospécifique et grégaire des sols sableux totalement dégradés (fig. 8) n'est pas une surprise. Cela s'explique uniquement par le fait qu'elle n'est pas appréciée du cheptel et que, avant d'atteindre une certaine taille, elle ne peut constituer une source de bois de feu pour les populations. Divers spécialistes s'accordent à dire que la présence accrue du *Leptadenia pyrotechnica* n'est au contraire que le signe d'une dégradation accrue de l'environnement sahélier et que son extension n'est que la conséquence des vagues de sécheresses, du surpâturage et de la destruction des ressources forestières.

Ainsi, une analyse diachronique de la zone de Tchago (39 km<sup>2</sup> dans le sud-est du Niger) montre bien l'évolution paysagère «classique» de la zone sahélierne (Tidjani, 2006). Nous illustrons ce propos sur base de photographies aériennes de décembre 1957 (IGN France, échelle 1/50000), mars 1975 (IGN Niger, échelle 1/60000) et décembre 1996 (IGN Niger, échelle 1/50000), ainsi qu'à l'aide d'une image Ikonos du 25 juillet 2005 (la figure 9 illustre un zoom de la zone étudiée).

En 1957, une grande partie de la zone (fig. 9a) était largement plantée d'arbres dont les couronnes se distinguent aisément ; la savane dense arborée occupait 33 % de la zone d'étude. Les établissements humains étaient strictement limités à deux petits villages (centre ouest) et les zones culturales représentaient 27 % de la zone d'étude.

En 1975, la situation est radicalement différente (fig. 9b). La savane dense arborée s'est fortement contractée et n'occupe plus que 8 % de l'espace étudié ; les arbres isolés ont quasi totalement disparu, sauf dans les cuvettes. Les cultures pluviales (dont l'extension se remarque au nord-ouest de la figure 9b) représentent la principale unité paysagère et s'étendent sur 40 % de la zone d'intérêt.

En 1996, la savane dense arborée s'est stabilisée (8 %) au contraire des zones cultivées qui atteignent 58 % de l'espace étudié. Il est intéressant de remarquer la mise en place d'un périmètre hydro-agricole (sud-ouest) réalisé par une ONG (SOS Sahel) dans le but d'appuyer le maraîchage dans la région et de protéger deux petites cuvettes de l'érosion éolienne. Par ailleurs, toute la végétation diffuse que l'on observe sur la quasi-totalité de la figure 9c n'est autre que la colonisation massive de *Leptadenia pyrotechnica*.

En 2005, le couvert arboré dense ne représente plus que

2 % de la zone analysée et se concentre désormais exclusivement autour des villages et des cuvettes pour les protéger de l'érosion éolienne (fig. 9d). Le périmètre de protection visible en 1996 présente un sérieux mitage en 2005 ; le projet a été abandonné au début des années 2000 lorsque l'ONG SOS Sahel s'est retirée. Par contre, une apparition importante de végétation dense est observée au Nord des villages. Il s'agit exclusivement de *Prosopis juliflora*, une espèce exotique invasive qui a été introduite par le projet de l'ONG mentionnée ci-dessus. Ce type de colonisation assistée par l'homme est fréquent au Sahel (Gonzalez *et al.*, 2004; Wezel, 2004; Niang *et al.*, 2008). Quant aux zones cultivées, elles occupent 60 % de l'espace. Le *Leptadenia pyrotechnica* reste fréquent même s'il semble présenter une diminution de sa présence. Une vérification sur le terrain nous a permis de confirmer que sa présence est exclusive comme le montre la figure 8.

La même observation pourrait être faite de l'extension du *Calotropis procera*, végétation typique de la zone sahélienne, qui tend à coloniser d'anciennes jachères et les zones fortement dégradées sur des sols d'épandage limono-sableux (Arbonnier, 2002). Ici aussi, cette colonisation grégaire, le plus souvent monospécifique, peut se faire parce que la plante est toxique pour les animaux et représente un piètre bois de feu (fig. 10).



Figure 10. Extension de *Calotropis procera* colonisant d'anciennes jachères fortement dégradées (Mâl, Mauritanie méridionale, février 2005). Photo P. Ozer.

Par ailleurs, toute personne ayant eu recours aux entretiens avec les populations locales au Sahel connaît les limites de cette technique quant à la perception du temps et de l'environnement (Gray et Morant, 2003). Finalement, il n'est pas inutile de signaler que Rasmussen *et al.* (2001) ont bien indiqué que les conclusions qu'ils tiraient localement n'étaient valables que pour leur site d'étude et qu'elles n'étaient pas généralisables à toute la région sahélienne. D'autres chercheurs, par

contre, ne se sont pas privés de citer leur étude en globalisant leur conclusion à tout le Sahel (par exemple, Olsson *et al.*, 2005; Herrmann *et al.*, 2005).

Niemeijer et Mazzucato (2002) ont également jeté un pavé dans le débat sur la désertification. Leur étude était basée principalement sur des mesures de qualité des sols et sur les données nationales de la FAO relatives à diverses cultures montrant d'une part que la qualité des sols ne s'était pas appauvrie et, d'autre part,

que les rendements s'étaient améliorés. Bien que les auteurs se focalisent uniquement sur le Burkina Faso, leurs conclusions s'appliquent à tout le Sahel. Or, un pays n'est pas nécessairement représentatif de toute une région, comme nous l'avons mentionné lors de l'analyse des précipitations au Niger et, par ailleurs, leurs mesures de qualité des sols ont été vivement contestées (Koochafkan, 2002).

Les données de la FAO relatives aux superficies cultivées et aux rendements pour le mil au Burkina Faso sont comparées avec les données obtenues pour le pays voisin, le Niger durant la période 1961-2007 (fig. 11 et 12). La figure 11 montre clairement que les évolutions des superficies cultivées sont radicalement différentes selon le pays étudié. Si, entre les années 1960 et la dernière décennie, le Burkina Faso a connu une augmentation de 70 % des superficies cultivées de mil, cet accroissement est de 196 % au Niger. D'autre part, si les rendements ont connu un accroissement de 86 % au Burkina Faso, ce même rendement s'est déprécié de 9 % au Niger (fig. 12). D'autres études vont dans le sens de la dégradation des rendements (Mortimore *et al.*, 2001 ; Gray et Morant, 2003). Pourtant, l'étude de Niemeijer et Mazzucato (2002), quoique décriée, est également citée systématiquement par les sceptiques vis-à-vis de la désertification.

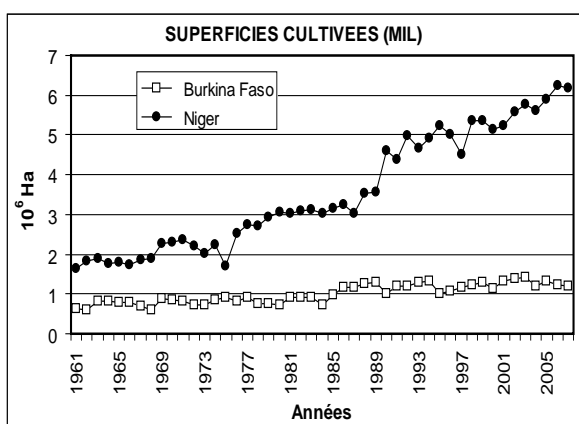


Figure 11. Evolution des superficies cultivées en mil au Burkina Faso et au Niger, de 1961 à 2007 (d'après les données de la FAO, 2010).

Finalement, l'étude de Eklundh et Olsson (2003), qui introduit la notion de reverdissement du Sahel, est basée uniquement sur l'analyse de l'indice de végétation (NDVI) du *Pathfinder* (valeurs maximales de NDVI générées tous les dix jours à une résolution spatiale de 8 x 8 km<sup>2</sup>) de NOAA sur la période 1982-1999. Les auteurs notent ainsi un reverdissement du Sahel. Quoi de plus normal, étant donné que le début des valeurs de NDVI sont contemporaines du paroxysme du déficit pluviométrique de la grande sécheresse (fig. 2) ! Cette même remarque a également été formulée par Anyamba et Tucker (2005). Certes, les auteurs expliquent ce reverdissement par une certaine amélioration pluviométrique globale, mais mettent surtout l'accent sur l'aspect de bonification anthropique des terres, comme le suggèrent aussi Rasmussen *et al.* (2001) et Niemeijer et Mazzucato (2002). Or, des études ultérieures menées sur tout le Sahel ont montré sur base des mêmes données satellitaires que le rapport entre le NDVI et la pluviométrie était constant dans 54 % des stations analysées, alors qu'une dégradation ou une amélioration de ce ratio s'observait dans respectivement 44,7 % et 1,3 % des cas (Hountondji *et al.*, 2009). Ceci montre que la bonification anthropique des terres n'est qu'un épiphénomène (Prince *et al.*, 2007), alors que la dégradation environnementale d'origine humaine est bien présente dans près d'un cas sur deux.

métrique globale, mais mettent surtout l'accent sur l'aspect de bonification anthropique des terres, comme le suggèrent aussi Rasmussen *et al.* (2001) et Niemeijer et Mazzucato (2002). Or, des études ultérieures menées sur tout le Sahel ont montré sur base des mêmes données satellitaires que le rapport entre le NDVI et la pluviométrie était constant dans 54 % des stations analysées, alors qu'une dégradation ou une amélioration de ce ratio s'observait dans respectivement 44,7 % et 1,3 % des cas (Hountondji *et al.*, 2009). Ceci montre que la bonification anthropique des terres n'est qu'un épiphénomène (Prince *et al.*, 2007), alors que la dégradation environnementale d'origine humaine est bien présente dans près d'un cas sur deux.

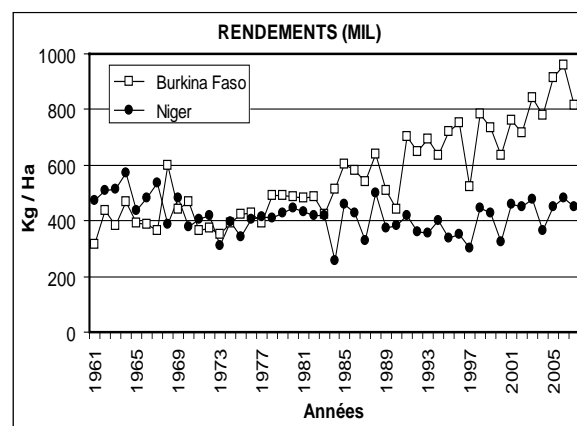


Figure 12. Evolution du rendement du mil au Burkina Faso et au Niger, de 1961 à 2007 (d'après les données de la FAO, 2010).

Et pendant ce temps, la plupart des indicateurs écologiques et socio-économiques restent désespérément dans le rouge. La fréquence et l'intensité des lithométéores, considérés comme un indicateur de désertification, ont été multipliés par huit au cours des 50 dernières années (Ozer, 2000) et leur présence régulière menace la santé humaine (De Longueville *et al.*, 2009). Les déplacements de réfugiés environnementaux au Sahel s'amplifient (Mbow *et al.*, 2008). Ceci étant dit, les recherches sur les migrations internationales dues aux modifications environnementales sont encore balbutiantes actuellement. Ainsi, il a été récemment montré que la majorité des flux migratoires provoqués par les sécheresses au Sahel sont avant tout internes et circulaires, une partie des migrants tendant à rejoindre leur région d'origine dès que possible (Henry *et al.*, 2004; Brown, 2008; Laczko et Aghazarm, 2009). Les mouvements sont complexes, se faisant tantôt entre zones rurales, tantôt de zones rurales à zones urbaines (Beauchemin et Bocquier, 2004; Ozer et Ozer, 2005 ; Mbow *et al.*, 2008). Même si on estime que la migration internationale est un mouvement qui requiert une certaine organisation et des ressources dont les personnes qui ont perdu leurs moyens d'existence ont peu de chances de disposer, des zones sensibles potentielles de

migration internationale ont néanmoins clairement été identifiées. Ces zones devront généralement faire face simultanément à des défis socio-économiques considérables ainsi qu'à des catastrophes climatiques et environnementales lentes (sécheresse et désertification) qui auront des conséquences sur la sécurité alimentaire. La région sahélienne fait ainsi partie des régions qualifiées de «préoccupantes» par les expertises internationales les plus récentes (Laczko et Aghazarm, 2009).

## 6. CONCLUSION

La désertification reste un problème majeur, bien plus d'ailleurs pour ceux qui en subissent les affres au quotidien que pour les scientifiques qui alimentent la polémique. Ces derniers, dans le cadre du Millenium Ecosystem Assessment, vont jusqu'à dire que la désertification au Sahel n'est pas vraiment aussi problématique que ce que d'aucuns estimaient (Lepers *et al.*, 2005). La réalité est que 88 % des études scientifiques publiées sur la désertification au Sahel entre 2001 et 2005 dans la littérature à diffusion internationale (reprises dans la plate-forme Web of Knowledge<sup>SM</sup> de Thomson-ISI) ont été réalisées par des chercheurs américains ou européens qui, le plus souvent, travaillent à distance sans tenir compte de la situation socio-économique des populations locales. Au contraire, les processus de désertification en Amérique du Nord sont majoritairement étudiés par des nord-américain (96 %) et cette même problématique en Chine est analysée à 71 % par des auteurs chinois (Ozer *et al.*, 2007). Ceci pourrait expliquer pourquoi Mexique, Etats-Unis et Chine seraient (selon Lepers *et al.*, 2005) plus touchés par les processus de désertification que la région sahélienne, où la détérioration physique et chimique des sols ainsi que l'érosion hydrique et/ou éolienne sont (seraient) totalement absentes.

Quoi qu'il en soit, c'est la lutte contre la désertification qui en pâtit et, avec elle, d'autres volets du développement en Afrique sahélienne, tels que la réduction de la pauvreté ou l'accomplissement des objectifs du Millénaire pour le Développement.

Ainsi, le problème de la faim est devenu structurel alors que les pluies annuelles tendent à se rétablir. Or, l'avenir est plus qu'incertain puisque la majorité des modèles climatiques montrent qu'il est fort probable que le Sahel subisse une réduction importante de la pluviométrie (qui serait alors équivalente à la sévère sécheresse de l'année 1984) de manière structurelle, dès le milieu du 21<sup>e</sup> siècle, du fait du réchauffement climatique (Held *et al.*, 2005). L'autre problème majeur réside dans le fait que les projections démographiques tablent sur une population sahélienne près de trois fois plus nombreuse à l'horizon 2050 (fig. 5, tableau 2).

Si nous nous focalisons sur le Niger, il appert d'une part que ce pays n'est plus autosuffisant depuis 1975 et doit importer chaque année une part croissante de son alimentation (Bost *et al.*, 2009) et, d'autre part, que 91

% du potentiel total des terres agricoles cultivables au Niger sont déjà exploités actuellement (Brown *et al.*, 2008) alors que les rendements peinent à s'améliorer. Dès lors, l'avenir de la souveraineté alimentaire de cet Etat semble compromis lorsque la croissance démographique est intégrée dans cette prospective. La question principale demeure de savoir comment ces populations s'adapteront à ces multiples contraintes dans les décennies à venir.

## Bibliographie

- Anyamba, A. et Tucker, C.J., 2005. Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981–2003. *Journal of Arid Environments* 63, 596-614.
- Arbonnier, M., 2002. Arbres, arbustes et lianes des zones sèches de l'Afrique de l'Ouest. CIRAD – MNHN. Pony-sur-Yonne, France.
- Beauchemin, C. et Bocquier, P., 2004. Migration and urbanization in Francophone West Africa, an overview of the recent empirical evidence. *Urban Studies* 41, 2245-2272.
- Bechler-Carmaux, N., Mietton, M. et Lamotte, M., 1999. Le risque de pénurie en eau potable dans la ville de Niamey (Niger). *Sécheresse* 10, 281-288.
- Bost, F., Carroué, L., Colin, S., Girault, C., Le Goix, R., Radvanyi, J. et Sanmartin, O., 2009. Images économiques du monde. *Géoéconomie – Géopolitique* 2010. Armand Colin, Paris.
- Brown, M.E., Funk, C.C., Verdin, J. et Eilerts, G., 2008. Response to "Ensuring food security". *Science* 320, 611-612.
- Brown, O., 2008. Migration and climate change. International Organization for Migration Research Series No 31, IOM, Geneva, Switzerland.
- Bugaje, I.M., 2006. Renewable energy for sustainable development in Africa, a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 10, 603-612.
- Chamard, P.C. et Courel, M.F., 1999. La forêt sahélienne menacée. *Sécheresse* 10, 11-18.
- Chippaux, J.P., Houssier, S., Gross, P., Bouvier, C. et Brissaud, F., 2002. Etude de la pollution de l'eau souterraine de la ville de Niamey, Niger. *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique* 95, 119-123.
- Dai, A., Lamb, P.J., Trenberth, K.E., Hulme, M., Jones, P.D. et Xie, P., 2004. The Recent Sahel drought is real. *International Journal of Climatology* 24, 1323-1331.
- Daouda, M., Ozer, P. et Erpicum, M., 1998. Conséquences de la sécheresse sur la longueur et l'amplitude de la saison des pluies au Niger. In , *Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology*. Demarée G., Alexandre J., De Dapper M. eds. Royal Meteorological Institute of Belgium / Royal Academy of Overseas Sciences, 497-506.
- De Longueville, F., Henry, S. et Ozer, P., 2009. Saharan Dust Pollution, Implications for the Sahel? *Epidemiology* 20, 780.
- Demarée, G.R., 1990. An indication of climatic change as seen from the rainfall data of a Mauritanian station. *Theoretical and Applied Climatology* 42, 139-147.
- Dregne, H.E. et Chou, N.T., 1992. Global Desertification, Dimensions and Costs. In, *Degradation and restoration of arid lands*. (Dregne H.E. ed.). Texas Tech University, Lubbock, Texas, pp. 249-82.
- Duchemin, G.J., 1951. L'inondation de l'Aftout Es Sahel et du poste de Nouakchott (Mauritanie, Trarza occidentale). *Bulletin de l'Institut Français d'Afrique Noire*, 13, 1303-1305.
- Eklundh, L. et Olsson, L., 2003. Vegetation index trends for the African Sahel 1982-1999. *Geophysical Research Letters*. 30 (8), 1430, 10.1029/2002GL016772.
- FAO, 1993. Forest Ressources Assessment 1990 – Tropical countries. FAO Forestry Paper No. 112, Rome, Italie.

- FAO, 1999. State of the world's forests 1999. FAO, Rome, Italie.
- FAO, 2001. State of the world's forests 2001. FAO Forestry Paper No. 140, Rome, Italie.
- FAO, 2005. Evaluation des ressources forestières mondiales 2005: Les 15 résultats principaux. <http://www.fao.org/forestry/foris/data/fra2005/kf/common/GlobalForestA4-FRsmall.pdf>, dernier accès le 23 mars 2006.
- FAO, 2006. Global Forest Resources Assessment 2005. FAO Forestry Paper No. 147, Rome, Italie.
- FAO, 2009. Food security statistics updated November 2009. <http://www.fao.org/economic/ess/food-security-statistics/en/>, dernier accès le 21 janvier 2010.
- FAO, 2010. FAOSTAT, FAO Statistical Databases. <http://faostat.fao.org/>, dernier accès le 21 janvier 2010.
- Frappart, F., Hiernaux, P., Guichard, F., Mougin, E., Kergoat, L., Arjounin, M., Lavenu, F., Koité, M., Paturel, J.E. et Lebel, T., 2009. Rainfall regime across the Sahel band in the Gourma region, Mali. *Journal of Hydrology* 375, 128-142.
- Geist, H.J. et Lambin, E.F., 2004. Dynamic causal patterns of desertification. *BioScience* 54, 817-829.
- Gonzalez, P., 2001. Desertification and a shift of forest species in the West African Sahel. *Climate Research* 17, 217-228.
- Gonzalez, P., Sy, H. et Tucker, C.J., 2004. Local knowledge and remote sensing of forest biodiversity and forest carbon across the Sahel. In, *The Sahel* (eds. Lykke A.M., Due M.K., Kristensen M., Nielsen I.), pp. 23-37. SEREIN Occasional Paper No. 17. Institute of Geography, Copenhagen, Denmark.
- Goudie, A.S., 1996. Climate, Past and present. In *The physical Geography of Africa*. Adams W.M., Goudie A.S., Orme A.R. eds., Oxford University Press, New York, 34-59.
- Gray, L.C. et Morant, P., 2003. Reconciling indigenous knowledge with scientific assessment of soil fertility changes in southwestern Burkina Faso. *Geoderma* 111, 425-437.
- Groisman, P.Y., Knight, R.W., Easterling, D.R., Karl, T.R., Hegerl, G.C. et Rasuvaev, V.N., 2005. Trends in intense precipitation in the climate record. *Journal of Climate* 18, 1326-1350.
- HDR (Human Development Report), 2005. Energy and the environment, Traditional fuel consumption (% of total energy requirements). <http://hdr.undp.org/statistics/data/indicators.cfm?x=205&y=1&z=1>, dernier accès le 23 mars 2006.
- Hein, L. et De Ridder, N., 2006. Desertification in the Sahel, a reinterpretation. *Global Change Biology* 12, 751-758.
- Held, I.M., Delworth, T.L., Lu, J., Findell, K.L. et Knutson, T.R., 2005. Simulation of Sahel drought in the 20<sup>th</sup> and 21<sup>st</sup> centuries. *PNAS* 102, 17891-17896.
- Henry, S., Schoumaker, B. et Beauchemin, C., 2004. The impact of rainfall on the first out-migration, a multi-level event-history analysis in Burkina Faso. *Population and Environment* 25, 423-460.
- Hens, L. et Boon, E.K., 1999. Institutional, legal, and economic instruments in Ghana's environmental policy. *Environmental Management* 24, 337-351.
- Herrmann, S.M., Anyamba, A. et Tucker, C.J., 2005. Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environmental Change Part A* 15, 394-404.
- Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., Van Der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K. et Johnson, C.A., 2001. *Climate Change 2001, The Scientific Basis*. Cambridge University Press, New York.
- Hountondji, Y.C., Sokpon, N. Nicolas, J. et Ozer, P., 2009. Ongoing desertification processes in the sahelian belt of West Africa, an evidence from the rain-use efficiency. in, *Recent Advances in Remote Sensing and Geoinformation Processing for Land Degradation Assessment*. Röder A., Hill J. (eds.), ISPRS Series, Taylor and Francis, 173-186.
- Hutchinson, C.F., Herrmann, S.M., Maukonen, T. et Weber, J., 2005. Introduction, The "Greening" of the Sahel. *Journal of Arid Environment* 63, 535-537.
- Jones, P.D. et Hulme, M., 1996. Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation, Methods and illustrations. *International Journal of Climatology* 16, 361-377.
- 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.
- Koohafkan, P., 2002. Discrepancies about soil degradation. *Environment* 44, 39-40.
- Krings, T., 1986. Les migrations des sahéliens au Mali entre 1981 et 1985 et leur installation spontanée à Mopti. *Cahiers Géographiques de Rouen* 26, 43-54.
- Kröpelin, S., Verschuren, D., Lezine, A.M., Eggermont, H., Cocquyt, C., Francus, P., Cazet, J.P., Fagot, M., Rumes, B., Russell, J.M., Darius, F., Conley, D.J., Schuster, M., Von Suchodoletz, H. et Engstrom, D. R., 2008. Climate-Driven Ecosystem Succession in the Sahara, The Past 6000 Years. *Science* 320, 765-768.
- Laczko, F. et Aghazarm, C., 2009. Migration, environment and climate change, assessing the evidence. International Organization for Migration (IOM), Geneva, Switzerland.
- Lamb, P.J., 1982. Persistence of subsaharan drought. *Nature* 299, 46-48.
- Laminou Manzo, O., 2010. Fixation des dunes dans le Sud-Est du Niger, évaluation de l'efficacité de la barrière mécanique, espèces ligneuses adaptées et potentialités d'inoculation mycorhizienne. Doctorat en Sciences agronomiques et ingénierie biologique. 142 p.
- Lebel, T. et Ali, A., 2009. Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007). *Journal of Hydrology* 375, 52-64.
- Lepers, E., Lambin, E.F., Janetos, A.C., Defries, R., Achard, F., Ramankutty, N. et Scholes, R.J., 2005. A synthesis of information on rapid land-cover change for the period 1981-2000. *BioScience* 55, 115-124.
- Lindqvist, S. et Tengberg, A., 1994. New evidence of desertification from case studies in northern Burkina Faso. *Desertification Control Bulletin* 25, 54-60.
- Mainguet, M., 1991. *Desertification, Natural background and human mismanagement*. Springer-Verlag, Berlin. 306 p.
- Mbow, C., Mertz, O., Diouf, A., Rasmussen, K. et Reenberg, A., 2008. The history of environmental change and adaptation in eastern Saloum-Senegal—Driving forces and perceptions. *Global and Planetary Change* 64, 210-221.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment), 2005. *Ecosystems and human well-being, Desertification Synthesis*. Washington, DC, World Resources Institute.
- Morel, R., 1998. Début de la sécheresse en Afrique de l'Ouest. In, *Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology*. Demarée G., Alexandre J., 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 Department, Niger, 1960-2000. *Drylands Research Working Paper 39e*. Drylands Research, Somerset, Royaume Uni, 52 p.
- NATIONS UNIES, 2010. Indicateurs des Objectifs du Millénaire pour le développement. <http://unstats.un.org/unsd/mdg/Home.aspx>, dernier accès le 21 janvier 2010.
- Niang, A.J., Ozer, A. et Ozer, P., 2008. Fifty years of landscape evolution in Southwestern Mauritania by means of aerial photos. *Journal of Arid Environments* 72, 97-107.
- Nicholson, S.E., 1978. Climatic variations in the Sahel and other African regions during the past five centuries. *Journal of Arid Environments* 1, 3-24.
- Nicholson, S.E., 2005. On the question of the "recovery"

- of the rains in the West African Sahel. *Journal of Arid Environments*, 63, 615-641.
- Niemeijer, D. et Mazzucato, V., 2002. Soil degradation in the West African Sahel. How serious is it? *Environment* 44, 20-31.
- Odihi, J., 2003. Deforestation in afforestation priority zone in Sudano-Sahelian Nigeria. *Applied Geography* 23, 227-259.
- Oldeman, L.R., Hakkeling, R.T.A. et Sombroek, W.G., 1991. World map of the status of human-induced soil degradation, an explanatory note. Second revised edition, International Soil Reference and Information Centre/United Nations Environment Programme, Wageningen/Nairobi.
- Olsson, L., Eklundh, L. et Ardo, J., 2005. A recent greening of the Sahel – trends, patterns and potential causes. *Journal of Arid Environments*, 63, 556-566.
- Ozer, A. et Ozer, P., 2005. Désertification au Sahel, Crise climatique ou anthropique ? *Bulletin des Séances de l'Académie royale des Sciences d'Outre-Mer* 51, 395-423.
- Ozer, P. et Erpicum, M., 1995. Méthodologie pour une meilleure représentation spatio-temporelle des fluctuations pluviométriques observées au Niger depuis 1905. *Sécheresse* 6, 103-108.
- Ozer, P., 2000. Les lithométéores en région sahélienne, un indicateur climatique de la désertification. *GEO-ECO-TROP*, 24, 1-317.
- Ozer, P., 2004. Bois de feu et déboisement au Sahel, mise au point. *Sécheresse* 15, 243-251.
- Ozer, P., Bodart, C. et Tychon, B., 2005. Analyse climatique de la région de Gouré, Niger oriental, récentes modifications et impacts environnementaux. *Cybergeo, Revue Européenne de Géographie*. No.308, 02/05/2005, 24 p. (<http://www.cybergeo.presse.fr>).
- Ozer, P., Erpicum, M., Demarée, G. et Vandiepenbeeck, M., 2003. The Sahelian drought may have ended during the 1990s. *Hydrological Sciences Journal*. J., 48, 489-492.
- Ozer, P., Gassani, J., Hountondji, Y.C., Niang, A.J. et Ambouta, K., 2007. La désertification est-elle en recul au Sahel ? Bois et Forêts des Tropiques 293, 23-28.
- Paturel, J.E., Servat, E., Delattre, M.O. et Lubes-Niel, H., 1998. Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Hydrological Sciences Journal* 43, 937-946.
- Petit-Maire, N., 1994. Les variations climatiques au Sahara, du passé au futur. *GEO-ECO-TROP* 16, 149-166.
- Pettitt, A.N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics* 28, 126-135.
- Peyre de Fabregues, B., 1990. Sécheresse et disparition des arbres fourragers au Sahel. *Sécheresse* 1, 103-108.
- Prince, S.D., Wessels, K.J., Tucker, C.J. et Nicholson, S.E., 2007. Desertification in the Sahel, a reinterpretation of a reinterpretation. *Global Change Biology* 13, 1308-1313.
- Quezel, P., 1965. La végétation au Sahara. Du Tchad à la Mauritanie. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Germany.
- Rasmussen, K., Fog, B. et Madsen, J.E., 2001. Desertification in reverse? Observations from northern Burkina Faso. *Global Environ. Change* 11, 271-282.
- Salama, M., Deconinck, J.N., Lotfy, M.F. et Riser, J., 1991. L'ensablement de Nouakchott, exemple de l'aéroport. *Sécheresse* 2, 101-109.
- Sene, S. et Ozer, P., 2002. Evolution pluviométrique et relation inondations – événements pluvieux au Sénégal. *Bulletin de la Société Géographique de Liège* 42, 27-33.
- Sircoulon, J., 1976. Les données hydropluvio-métriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale. Comparaison avec les sécheresses «1913» et «1940». *Cahiers ORSTOM, série Hydrologie* 13, 75-174.
- Tappan, G.G., Sall, M., Wood, E.C. et Cushing, M., 2004. Ecoregions and land cover trends in Senegal. *Journal of Arid Environments* 59, 427-462.
- Tarhule, A. et Woo, M., 1998. Changes in rainfall characteristics in northern Nigeria. *International Journal of Climatology* 18, 1261-1271.
- Tarhule, A., 2005. Damaging rainfall and flooding, the other Sahel hazards. *Climatic Change* 72, 355-377.
- Thomas, D.S.G., 1993. Sandstorm in a teacup? Understanding desertification. *The Geographical Journal* 159, 318-331.
- Tidjani, A., 2006. Apport de la télédétection dans l'étude de la dynamique environnementale dans la région de Tchago (Nord ouest de Gouré). DEA en Sciences, Université de Liège, 79 p.
- Toure, I., 2002. L'approvisionnement en énergie traditionnelle et impacts dans les villes africaines. Le cas de la ville de Bamako (Mali). *Liaison Energie-Francophonie* 54, 27-32.
- Tricart, J., 1959. Géomorphologie dynamique de la moyenne vallée du Niger (Soudan). *Annales de Géographie* 368, 333-343.
- UNITED NATIONS, 1994. Elaboration of an international convention to combat desertification in countries experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa. <http://www.unccd.int/>, dernier accès le 23 mars 2006.
- UNPP [Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat], 2009. *World Population Prospects, The 2008 Revision*. <http://esa.un.org/unpp>, dernier accès le 21 janvier 2010.
- Vannitsem, S. et Demarée, G., 1991. Détection et modélisation des sécheresses au Sahel. *Hydrologie continentale* 2, 155-171.
- Verheye, W.H., 1990. Une approche agropédologique de la désertification. *Sécheresse* 1, 94-97.
- Wezel, A., 2004. Local knowledge of vegetation changes in Sahelian Africa – implications for local resource management. In, *The Sahel* (eds. Lykke A.M., Due M.K., Kristensen M., Nielsen I.), pp. 37-52. SEREIN Occasional Paper No. 17. Institute of Geography, Copenhagen, Denmark.
- WORLD BANK, 2003. *World development report 2003, Sustainable development in a dynamic world, transforming institutions, growth, and quality of life*. Oxford University Press, New Delhi.
- WWW1. <http://www.citypopulation.de/>, dernier accès le 21 janvier 2010.
- Zeng, N. et Yoon, J., 2009. Expansion of the world's deserts due to vegetation albedo feedback under global warming. *Geophysical Research Letters* 36, L17401.