

Désertification au Sahel : crise climatique ou anthropique ?

par

André OZER* & Pierre OZER**

MOTS-CLES. — Sahel; Désertification; Sécheresse; Pression anthropique; Dégradation environnementale.

RESUME. — Le Sahel, au cours de ces dernières décennies, a connu deux crises majeures de sécheresse presque contiguës. Actuellement, et depuis le début des années 1990, la tendance pluviométrique montre un retour vers les normes antérieures aux années 1970 avec, cependant, une intensité des pluies nettement plus importante et une longueur de la saison des pluies qui semble ne pas s'améliorer par rapport aux décennies de sécheresse.

Par ailleurs, depuis la moitié du 20^e 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 constante des rendements des cultures, mais également une forte réduction de la biodiversité. L'une des conséquences se marque dans la réactivation des dunes anciennes mises en place au cours du dernier interpluvial (18 000 BP).

L'article fait le point sur la controverse actuelle qui entoure les processus de désertification avant de conclure que si les crises de sécheresse des années 1970 et 1980 ont été catastrophiques pour les populations du Sahel, les croissances anthropiques actuelle et future vont engendrer une désertification grandissante dans la bordure sud du Sahara.

TREFWOORDEN. — Sahel; Verwoestijning; Droogte; Antropische druk; Milieu-aantasting.

SAMENVATTING. — *Verwoestijning in de Sahel: klimaat- of antropische crisis?* — In de loop van de laatste decennia heeft de Sahel twee belangrijke en bijna opeenvolgende droogtecrises gekend. Tegenwoordig, en sedert het begin van de jaren 1990, wijst de pluviometrische tendens op een terugkeer naar de normen van vóór de jaren 1970 met ech-

* Vice-directeur de la Classe des Sciences naturelles et médicales; Département de Géographie, Université de Liège, allée du 6 Août 2, B-4000 Liège (Belgique).

** Département des Sciences et Gestion de l'Environnement, Université de Liège, av. de Longwy 185, B-6700 Arlon (Belgique).

ter een opvallend grotere regenintensiteit en niet echt een verbetering wat de duur van het regenseizoen betreft t.o.v. de decennia van droogte.

Bovendien is de bevolking van de Sahel sedert de helft van de 20ste eeuw meer dan verdrievoudigd en de vooruitzichten voor 2050 stellen een groeifactor voorop van de orde van grootte van 10. De percentages m.b.t. de bevolkingsaan groei in de steden zijn nog indrukwekkender en leiden elke dag tot ingrijpende milieuveranderingen. Een dergelijke antropische druk veroorzaakt ongecontroleerde ontbossing om aan de energiebehoeften van de bevolking, de vraag naar timmerhout en de landbouwexpansie te kunnen voldoen. Bovendien zorgt de steeds groter wordende veestapel die het met een steeds kleiner wordend parcours moet stellen voor overbeweiding. Dit alles brengt een aantasting van de bodembegroeiing, een gestage vermindering van het teeltrendement, maar ook een forse afbrokkeling van de biodiversiteit teweeg. Een van de gevolgen is de reactivering van de oude duinen gevormd tijdens de laatste interpluviale fase (18 000 BP).

Het artikel maakt de balans op van de actuele controverse rond het verwoestijningsproces vooraleer te besluiten dat, terwijl de droogtecrises van de jaren 1970 en 1980 een ware catastrofe betekenden voor de bevolkingen van de Sahel, de huidige en toekomstige antropische groei een steeds toenemende desertificatie zullen meebrengen aan de zuidelijke rand van de Sahara.

KEYWORDS. — Sahel; Desertification; Drought; Human Pressure; Environmental Degradation.

SUMMARY. — *Desertification in the Sahel: Climatic or Anthropic Crisis?* — Over the last decades, the Sahel suffered two dramatic contiguous droughts. At present, and since the early 1990s, rainfalls have recorded an amelioration that tends towards the average of precipitation previous to the 1970s. However, this improvement may be due to increasing rainfall intensity and it seems that the length of the rainy season did not show any extension when compared to the 1970s and 1980s.

Moreover, the Sahelian population has been multiplied by 3 since 1950 and is foreseen to be multiplied by 10 by the second half of the 21st century. Increasing urban population levels are much more impressive and bring about important environmental disruptions every day. Such increasing human pressure leads to uncontrolled deforestation in order to meet the needs in fuel wood, wood for construction and shifting cultivation. In addition, the ever-increasing number of herds for contracting range conditions leads to overgrazing. All these processes cause the degradation of the vegetation cover, a constant diminution of crop yields, as well as a strong reduction of biodiversity. One of the consequences is the reactivation of previously fixed dunes that were formed during the last interpluvial phase (18,000 BP).

This article provides a state-of-the-art of the present controversy about desertification processes and concludes that if the droughts of the 1970s and 1980s have had dramatic consequences for the population of the Sahel, current and coming increasing human pressure will intensify the desertification of the southern fringe of the Sahara.

Introduction

La désertification est actuellement considérée comme l'une des problématiques environnementales les plus préoccupantes du 21^e 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 forte à la problématique de la désertification. C'est ainsi que, en 1994, la Convention des Nations Unies pour la 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». La dégradation des terres étant à son tour définie comme étant «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 & 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 1 200 millions d'hectares (MEA 2005). Les études réalisées par le passé en sont arrivées à de multiples conclusions variant de 12 % (MEA 2005) à 70 % (DREGNE & CHOU 1992) des zones arides, semi-arides et subhumides sèches, en passant par une autre estimation de 20 % (OLDEMAN *et al.* 1991).

Dans le cadre de cet article, nous tenterons de répondre à la question de savoir si la désertification au Sahel est une crise climatique ou anthropique et si les processus de dégradation environnementale sont en déclin, comme l'affirme un courant fort actuel, ou si les efforts de ces dernières décennies en matière de lutte contre la désertification ont été vains.

La région sahélienne

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*) (QUEZEL 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 très faible couverture végétale favorise 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*) (VERHEYE 1990). Donc, le secteur entre 300 et 700 mm est caractérisé par une agriculture sous pluies et par une population sédentaire. Il est évident que des modifications dans le régime des précipitations entraînent des variations temporaires de ces limites et engendrent donc des problèmes sociaux et environnementaux considérables. Ainsi, OZER & ERPICUM (1995) ont montré que le positionnement de l'isohyète de 300 mm durant les périodes 1950-1967 et 1968-1985 avait connu un retrait important vers le sud pouvant atteindre 200 km.

Si les limites du Sahel se sont modifiées ces dernières décennies, au cours des derniers millénaires, la limite Sahel-Sahara a été sujette à de multiples fluctuations. En effet, la présence de dunes aujourd'hui fixées par la végétation et datées de l'Ogolien prouve qu'il y a 18 000 ans, lors du dernier interpluvial, le Sahara s'étendait jusqu'à plus de 500 km plus au sud de sa limite actuelle (GOUDIE 1996). Par contre, en fonction des dépôts lacustres datant du début de l'Holocène (8 000 à 7 000 ans), il apparaît que le Sahara débutait seulement à environ 500 km plus au nord par rapport à aujourd'hui (PETIT-MAIRE 1994).

Ces fluctuations récentes de l'ordre de 1 000 km de la bordure sud du Sahara ne sont pas toutes expliquées, mais à cette époque, il est vraisemblable que l'influence anthropique était négligeable.

Evolution climatique au Sahel et conséquences

La littérature commentant les fluctuations pluviométriques en Afrique de l'Ouest est abondante (SIRCLOUN 1976 ; NICHOLSON 1989 ; HULME 1992 ; MOREL 1996, 1998). En réalité, la zone sahélienne a longtemps été, du point de vue pluviométrique, la région la plus étudiée au monde (HUFTY 1994). L'intérêt particulier suscité par cette région spécifique s'explique par le fait que celle-ci a connu le déficit pluviométrique le plus important jamais enregistré au cours du 20^e siècle, tant dans son intensité que dans sa durée (HULME 1996, JONES & HULME 1996, DAI *et al.* 1998).

La région sahélienne a toujours connu une alternance de périodes humides et sèches (MALEY 1973 ; NICHOLSON 1978, 1996, 1998). Au cours du 20^e 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 (SIRCOULON 1976, VANNITSEM & DEMAREE 1991). Malheureusement, peu de données pluviométriques témoignent de cette première sécheresse. Ces années sont restées gravées dans la tradition orale des populations locales (BOUREIMA 1992, KARIMOUNE 1994) sous les noms de *Tasbane* (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, 1996).

Pour les deux sécheresses suivantes, un nombre suffisant d'informations pluviométriques est disponible. Aussi, avant de les décrire, nous allons brièvement présenter l'évolution annuelle des précipitations au Niger.

Etant donné leur forte hétérogénéité spatiale, LAMB (1982) a proposé une analyse régionalisée des précipitations dénommée «indice d'anomalie pluviométrique». Cet indice est calculé suivant l'équation :

$$X_j = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} \frac{r_{ij} - \bar{r}_i}{\sigma_i} \quad [Eq. 1]$$

où r_{ij} est la pluie mesurée en une année j à une station i , et \bar{r}_i et σ_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 .

La représentation graphique de l'évolution des précipitations en région sahélienne obtenue par l'application de cette formule est présentée à la figure 1 pour

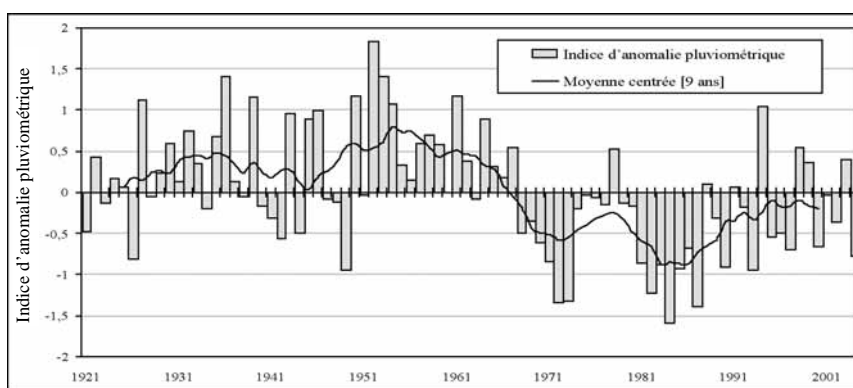


Fig. 1. — Evolution des précipitations au Niger de 1921 à 2004 exprimée en fonction de l'«indice d'anomalie pluviométrique» calculé sur vingt stations (d'après la méthode de LAMB 1982).

la période 1921-2004. Ce diagramme est basé sur les pluies annuelles dans vingt stations au Niger. Les stations sélectionnées sont celles 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. Le choix du Niger a été conditionné par la disponibilité des données fournies par la Direction de la Météorologie nationale du Niger.

La figure 1 offre ainsi une bonne représentation temporelle régionale des précipitations. Dans le but de rendre ce graphique plus facilement compréhensible, l'écart-type a été converti en millimètres en «dé-normalisant» l'équation 1 de la manière suivante (JONES & HULME 1996) :

$$P_j = X_j \bar{\sigma} + \bar{P} \quad [Eq. 2]$$

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

La représentation obtenue est ainsi présentée à la figure 2.

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 1921-2004 alternant avec des années fortement arrosées. La moyenne centrée sur neuf ans (fig. 1) ne passe d'ailleurs pas sous la moyenne 1921-2004 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 & ERPICUM 1995) et leur poids est donc atténué dans la moyenne régionale ; (ii) la sécheresse n'a été durement ressentie essentiellement que dans l'extrême ouest sahélien (VANNITSEM & DEMAREE 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 soixante. En effet, dès 1968, la moyenne centrée sur neuf ans plonge sous la moyenne 1921-2004. De 1921 à 1967, 68 % des années connaissent une pluviométrie excédentaire par rapport à la moyenne 1921-2004, alors que 81 % des années comprises dans la période 1968-2004 enregistrent des précipitations déficitaires. De 1921 à 1967, huit années sont fortement excédentaires (moyenne + écart-type) alors qu'aucune n'est fortement déficitaire (moyenne - écart-type). Au cours des trente-sept dernières années analysées, cinq ont été fortement déficitaires alors qu'une seule a été fortement excédentaire.

A partir des données obtenues pour le Niger (figs 1, 2), il est possible de mettre en évidence la non-stationnarité des séries pluviométriques survenue pendant la période 1921-2004. Cela revient à dire qu'il est possible d'isoler les périodes d'anomalies pluviométriques (périodes fortement pluvieuses ou de sécheresse). Pour ce faire, le test non paramétrique de PETTIT (1979), capable

d'estimer la position d'un changement de moyenne (point de rupture) dans une série, a été appliqué à cette série. Il ressort de l'application de ce test qu'un seul point de rupture est identifié en 1967 ($p < 0,0001$) et met en évidence le déficit pluviométrique de ces trente-cinq dernières années. Ceci est en accord avec les travaux similaires précédents relatifs à l'analyse, station par station, des séries pluviométriques sahéliennes (VANNITSEM & DEMAREE 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). Plus de 100 mm séparent les périodes 1921-1967 et 1968-2004 dont la pluviométrie moyenne est respectivement de 514 mm et 409 mm, soit une diminution de la pluviométrie de plus de 20 %. Notons que le changement pluviométrique est encore plus dramatique étant donné que les années cinquante ont constitué la décennie la plus arrosée du siècle comme en témoigne la moyenne centrée sur neuf ans (fig. 2). En effet, plus de 220 mm séparent les extrémités des années cinquante et des années quatre-vingt.

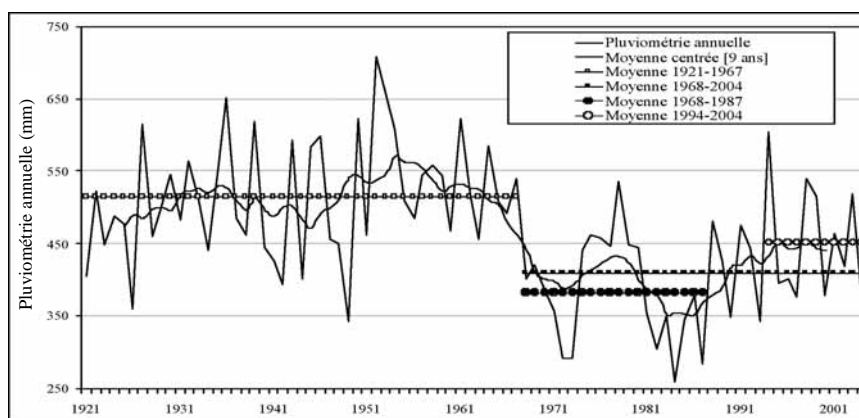


Fig. 2. — Précipitations annuelles au Niger (d'après la méthode de JONES & HULME 1996), moyennes des sous-séries pluviométriques avant et après le point de rupture de 1967, ainsi que pour les sous-séries 1968-1987 et 1994-2004 (données provenant de vingt stations).

Notons que cette rupture de tendance généralisée s'est progressivement marquée bien plus au sud jusqu'à approximativement 10 °N de latitude (MOREL 1998, GAUTIER *et al.* 1998, PATUREL *et al.* 1998, TARHULE & 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 1968-2004) ne détecte pas d'autres ruptures significatives ($p < 0,05$). Cependant, une certaine amélioration des précipitations a été observée depuis la rupture de 1967. Si certains auteurs soutiennent que la sécheresse continue (L'HOTE *et al.* 2002), de plus en plus d'auteurs remarquent que la pluviométrie s'est véritablement améliorée durant les années 1990 (DAI *et al.* 2004 ; NICHOLSON 2005 ; HOUNTONDI *et al.* 2005, 2006a, 2006b). En outre, OZER *et al.* (2003) ont suggéré que la sécheresse sahélienne aurait pu se terminer durant les années 1990. En effet, l'application du test de PETTITT (1979) à la sous-série 1968-2004 détecte 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). Des vingt stations nigériennes analysées, une présente une rupture significative et sept autres une rupture peu significative entre 1987 et 1993. L'analyse de la figure 1 montre en effet que les années déficitaires enregistrées depuis le début des années 1990 ne s'écartent jamais de plus d'un écart-type de la moyenne (contre cinq années durant les décennies 1970 et 1980), et que ces dernières sont souvent contrebalancées par des années de pluviométrie excédentaires. La comparaison des pluviométries moyennes enregistrées durant les périodes 1968-1987 et 1994-2004 montre une différence de près de 70 mm avec 383 mm et 452 mm respectivement, soit une augmentation de la pluviométrie de 18 %. Bien sûr, cette dernière moyenne reste largement inférieure à celle de la période 1921-1967 (514 mm).

Si cette rupture climatique survenue en 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 (ERPICUM *et al.* 1988, GUEYE & SIVAKUMAR 1992, OZER & ERPICUM 1995, DIOP *et al.* 1996, DAOUA *et al.* 1998) entraînant donc, automatiquement, une diminution des possibilités de production céréalière dans les régions les plus fragiles. A titre d'exemple, DAOUA *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 récente de la longueur de la saison des pluies consécutive à cette 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, et ce, malgré un retour à une pluviométrie annuelle plus abondante (test de Pettitt, $p = 0,06$). Si cette conclusion doit bien sûr être confirmée par l'analyse d'un plus grand nombre de stations, elle pose néanmoins question. Cependant, il est évident que 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 (DEMAREE 1990, TARHULE & WOO 1998, VAN GOMPEL & DECLEIR 1998). Ainsi, comme le montrent la figure 3 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 constante du nombre de jours de pluie (-3,0 % par décennie, $p < 0,001$) qui se reflète dans l'augmentation significative 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 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^e percentile), très intenses (> 95^e percentile) et extrêmes (> 99^e percentile) ont tous augmenté au cours de la période 1940-2002. Cette augmentation est impressionnante au cours des quinze dernières années (tab. 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 (SENE & OZER 2004, TARHULE 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/jours), et le nombre de jours de pluie supérieurs aux 90^e et 99^e 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 ^e p	4,1	4,0	3,2	5,3
Jours de pluie > 99 ^e p	0,41	0,29	0,30	0,80

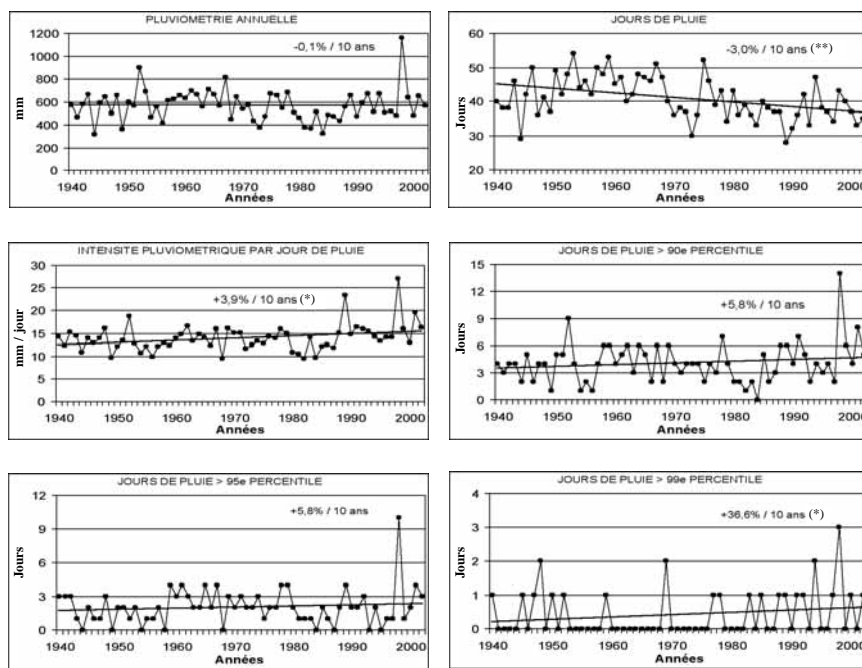


Fig. 3. — Tendances de la pluviométrie annuelle, du nombre de jours de pluie, de l'intensité pluviométrique moyenne par jour de pluie, et du nombre de jours de pluie supérieurs aux 90^e, 95^e et 99^e percentiles à Niamey (Niger) de 1940 à 2002. Les tendances significatives ($p < 0,05$) et très significatives ($p < 0,01$) sont indiquées respectivement par (*) et (**).

Evolution anthropique et conséquences

LA CROISSANCE GALOPANTE DE LA POPULATION

La population sahélienne connaît une des croissances démographiques les plus élevées au monde. Depuis 1950, la population totale a été multipliée par quatre (fig. 4). Selon les Nations Unies (UNPP 2006), la population sahélienne devrait encore doubler d'ici à 2030 et dépasser les 193 millions d'habitants en 2050, soit douze fois plus qu'en 1950 (16 millions). 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 (fig. 5).

Le taux de croissance annuel actuel de 3,5 % est vertigineux et correspond à un doublement de la population en vingt-deux ans environ. On compte maintenant une augmentation de la population dépassant les deux millions d'individus par an dans notre zone d'étude.

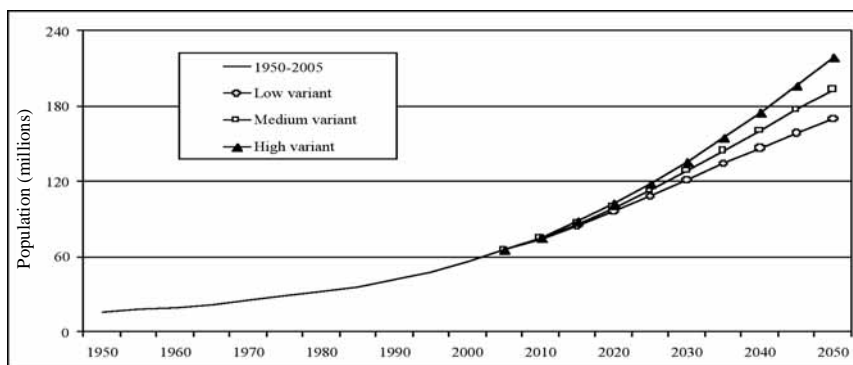


Fig. 4. — Evolution de la population sahélienne de 1950 à 2005 et projections (avec marges d'incertitude) pour la période 2005-2050 (d'après UNPP 2006).

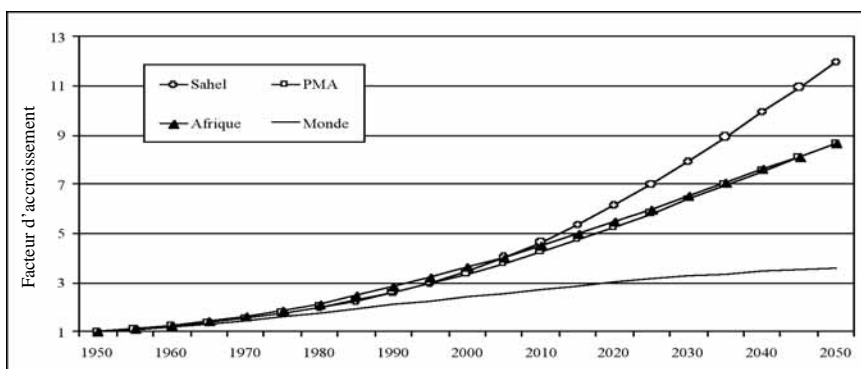


Fig. 5. — Augmentation de la population du Sahel, des pays les moins avancés, de l'Afrique, et mondiale par rapport à 1950 (d'après UNPP 2006).

Plus impressionnante encore est certainement l'augmentation des populations s'agglutinant dans les grandes villes, essentiellement les capitales. La superficie bâtie de la ville de Ouagadougou a été multipliée par trois de 1986 à 1997 (VAN DEURSEN *et al.* 1999). L'implantation, au détriment d'espaces verts, de quartiers spontanés à Bamako depuis la première grande sécheresse (DIARRA & CHAMPAUD 2000), et plus spécifiquement entre 1986 et 1996, a bien été mise en évidence grâce à une étude satellitaire diachronique (CHAMPAUD *et al.* 1998). La population de la ville de Dakar était de 798 792 habitants lors du recensement de 1976. En 1988, la population avait presque doublé avec 1 375 070 habitants. Lors du dernier recensement de 2002, la population de la capitale du Sénégal frôlait les deux millions (WWW1). Nouakchott, capitale de la Mauritanie, dépasse largement le million d'habitants et abrite actuellement près de 40 % de la population mauri-

tanienne. Mais cette capitale ne comptait que 535 000 habitants en 1988 contre 135 000 en 1977 et 6 000 en 1962 (SALAMA *et al.* 1991) et n'était considérée en 1951 que comme un «poste» abritant quelques dizaines d'habitations (DUCHEMIN 1951). On ne s'étonnera dès lors pas de noter que la population urbaine a été multipliée par plus de cent 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. Au Niger, seules les villes de Zinder (54 000 habitants) et Niamey (233 000 habitants) avaient une population supérieure à 50 000 personnes en 1977. En 2001, six villes dépassaient ce seuil, la population de Zinder et de Niamey étant de 171 000 et 708 000 habitants, respectivement (WWW2). En près de vingt-cinq ans, le nombre de villes abritant plus de 10 000 habitants a triplé, passant de 12 000 à 35 000 (fig. 6).

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 des «victimes de la sécheresse» ou «victimes de la pauvreté» ou «réfugiés environnementaux» ou encore «victimes de la désertification» (PITTE 1975, KRINGS 1986, FOURNIER 1987, OUALLET 1987, GALLAIS 1988, LOPEZ BERMUDEZ 1994, THOMAS & MIDDLETON 1994, HENS & BOON 1999). En 2030, la population sahélienne urbaine devrait presque être égale à la population rurale. Cette évolution est remarquable quand on sait que la population urbaine représentait bien moins que 10 % de la population totale sahélienne en 1950.

Cette augmentation des populations urbaines est réellement préoccupante dans les pays du Sahel et participe chaque jour aux bouleversements environnementaux que connaissent les zones périphériques de ces agglomérations. En effet, ces nouveaux habitants doivent construire leurs logements, cuire leurs aliments, boire, se laver, etc., ce qui demande d'énormes ressources en eau, en énergie et en matières premières. Ainsi, en ce qui concerne la consommation en eau, il est estimé qu'elle atteint environ 140 l par jour et par personne dans les centres urbains contre 15 l seulement en zone rurale (YERGEAU *et al.* 1991). 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 ainsi que par l'augmentation continue de la demande (BECHLER-CARMAUX *et al.* 1999). 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 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 clairement le cas à Dakar, Saint-Louis ou encore Nouakchott qui connaissent de dramatiques

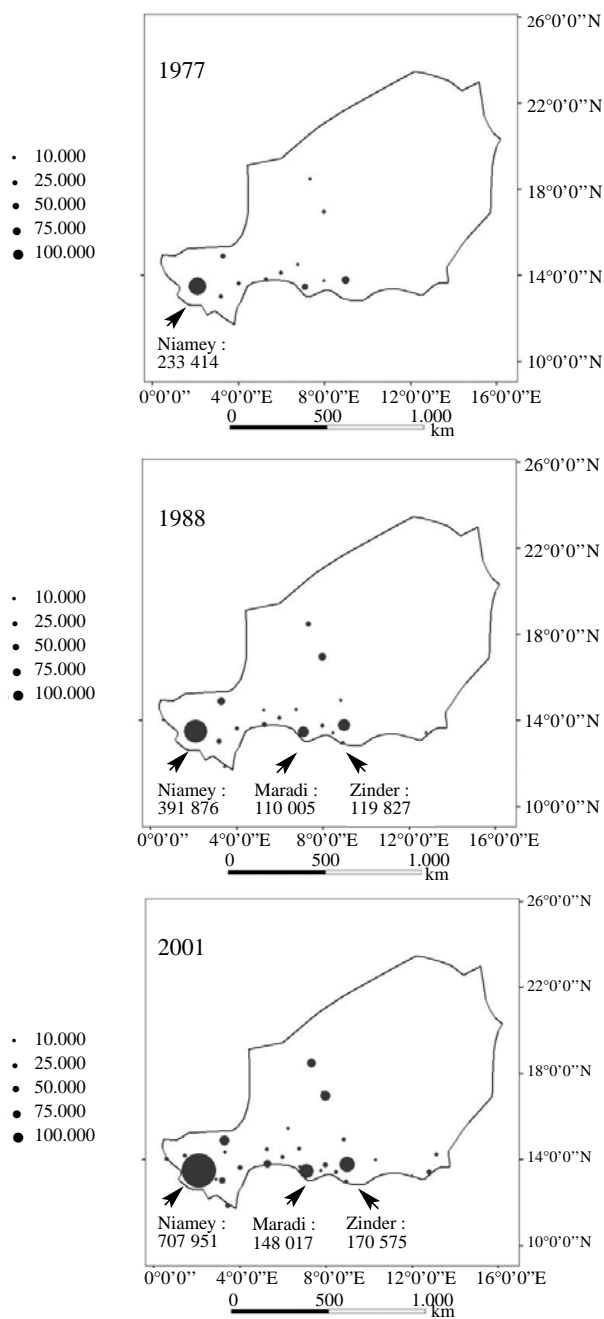


Fig. 6. — Evolution des centres urbains au Niger en 1977, 1988 et 2001 (d'après WWWW2).

inondations dès qu'une pluie dont la période de retour est supérieure à six ans tombe (SENE & OZER 2002). A Niamey, l'insuffisance, voire l'absence, des infrastructures d'assainissement et de collecte des ordures ménagères est à l'origine de la contamination par des matières organiques d'origine humaine et animale des eaux des nappes superficielles accessibles par les puits. Cette pollution constitue un risque sanitaire potentiel important pour une majorité des habitants de la capitale du Niger (CHIPPAUX *et al.* 2002).

LE DEBOISEMENT

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 (JANZEN 1998, CHAMARD & COUREL 1999) et la problématique du déboisement est extrêmement importante dans les régions aride, semi-aride et subhumide sèche car elle contribue à l'avancée de la désertification (OZER 2000, GEIST & LAMBIN 2004).

A partir d'une analyse exhaustive de la littérature, ARIORI & 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 -2,0 % au cours des dernières décennies. Des quarante-quatre sites forestiers analysés, quinze ont disparu durant la deuxième moitié du 20^e siècle, et tous les autres ont enregistré une diminution de plus de 50 % de leur superficie. Un exemple frappant étant l'évolution des vingt-sept 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).

Ce déboisement continu a clairement 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 quatorze 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 cent vingt-trois espèces ligneuses répertoriées dans le Sahel par WEZEL (2004), vingt ont disparu, septante-neuf sont en déclin, onze sont stables et treize (dont onze exotiques) ont progressé durant ces trente à cinquante dernières années.

Par ailleurs, il ressort clairement de cette étude que les coupes abusives pour satisfaire les besoins en énergie des populations et la demande en bois d'œuvre (93 %) et l'expansion agricole (89 %) représentent les deux principales causes directes de déboisement. Le surpâturage (39 %) et les feux de brousse (36 %) ne semblent être que des facteurs secondaires, le plus souvent empêchant la régénération naturelle des ligneux. L'impact direct de la sécheresse sur la contraction des ressources forestières semble limité et n'est cité que dans 16 % des cas.

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 dans les pays les moins développés, l'Afrique subsaharienne et la population mondiale, respectivement (HDR 2005). Les divers projets de diversification énergétique entrepris en Afrique sahélienne n'ont que rarement atteint leurs objectifs car trop coûteux ou menés sans le suivi approprié (FOLEY *et al.* 2002, 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 millions d'habitants (BUGAJE 2006). Logiquement, c'est le bois qui reste la principale source d'énergie. Et même si son prix augmente sans cesse (BRONDEAU 2001, ODIHI 2003), il reste bien inférieur aux autres sources d'énergie et, surtout, 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 15 300 à 70 000 tonnes entre 1990 et 2000 (TOURE 2002). Ceci soulève donc une nouvelle problématique car, si le charbon de bois a un pouvoir calorifique supérieur à celui du bois de chauffe, à savoir 6 400 kcal/kg contre 3 400 kcal/kg, il faut approximativement entre 4 et 6 kg de bois pour obtenir 1 kg de charbon (CHAMARD & 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 l'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 huit cents 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 7 présente les résultats obtenus par cette institution des Nations Unies de 1980 à 2005 et laisse l'observateur 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, le recul des superficies forestières a connu son apogée entre 1990 et 1995 (-1,0 % par an) et a ralenti par la suite pour

atteindre un rythme annuel de $-0,6\%$ entre 2000 et 2005. Plus surprenant encore est la fluctuation des superficies forestières qui sont sans cesse modifiées à la hausse entre les différentes évaluations de la FAO. Ainsi, de $43,6 \cdot 10^6$ ha en 1980 (FAO 1993), les superficies forestières étaient de $45,0 \cdot 10^6$ ha en 2000 pour finalement s'établir à $43,6 \cdot 10^6$ ha en 2005 (FAO 2006b). En d'autres termes, les superficies forestières seraient restées inchangées au cours des vingt-cinq dernières années... Devant ce constat, il semble clair que ces données ne sont pas utilisables dans l'objectif de réaliser un suivi-évaluation de la désertification.

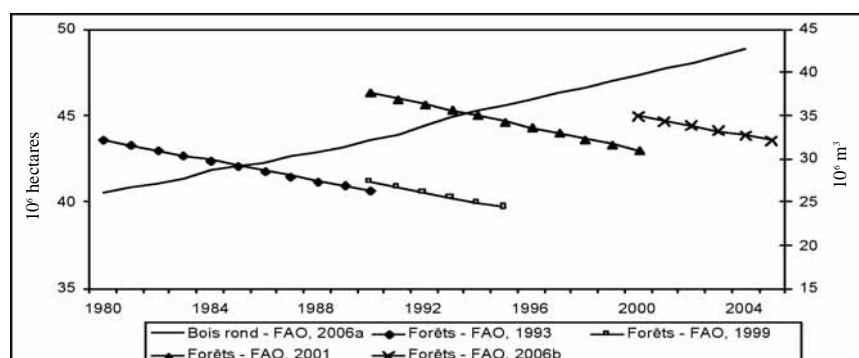


Fig. 7. — Evolution de la superficie forestière et de la production annuelle de bois rond dans la zone d'étude (Mauritanie, Sénégal, Guinée-Bissau, Mali, Burkina Faso, Niger et Tchad), de 1980 à 2005 (d'après les statistiques de la FAO).

LE (SUR)PATURAGE

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

La figure 8 présente l'évolution du cheptel de 1961 à 2005 dans notre zone d'étude (d'après FAO 2006a). Il y apparaît que les bovins présentent une forte vulnérabilité durant les graves crises de sécheresse comme la période 1972-74 où ce cheptel a perdu plus d'un quart de sa population en passant de 20,3 à 14,7 millions de têtes. De même, lors de la période 1983-85, alors que la population bovine totale avait quasi égalé le niveau de 1971, une autre crise aiguë de sécheresse a engendré la perte de 4,5 millions de têtes de bétail (soit plus de 20 % du cheptel bovin) durant ces trois années. En 2005, l'augmentation moyenne pour notre zone d'intérêt est néanmoins de 76 % par rapport à 1961. L'évolution de ces vingt dernières années est impressionnante avec un accroissement annuel moyen de 3,7 %.

Les ovins et caprins présentent tous deux une évolution similaire de leur nombre. Moins vulnérables par rapport aux forts déficits pluviométriques, ils présentent respectivement une augmentation de 164 % et 177 % par rapport à 1961. L'évolution de ces vingt dernières années est déconcertante avec un accroissement annuel moyen de 4,1 % pour les ovins et de 5,9 % pour les caprins.

Si les données de la FAO ne commencent qu'en 1961, il est à noter que MAINGUET (1991) propose des chiffres inouïs pour notre zone d'étude entre le début du 20^e siècle et 1980, avec une augmentation approximative d'un facteur cinq pour les ovins et les caprins et d'un facteur dix pour les bovins. En surimposant les données de la FAO (2006a) disponibles depuis les années quatre-vingt, la population des bovins, ovins et caprins, aurait donc été multipliée respectivement par quatorze, huit et dix en un siècle.

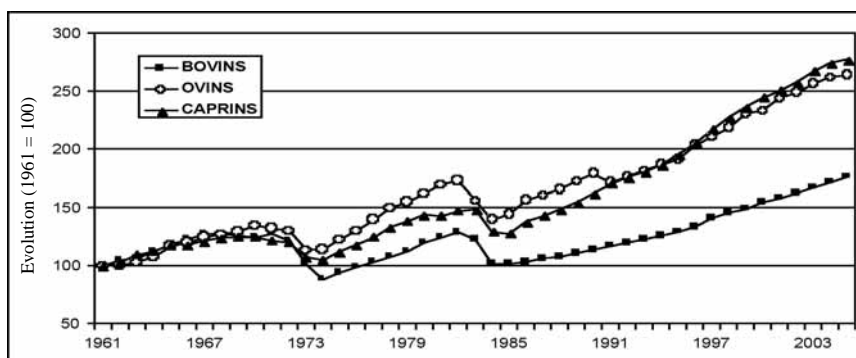


Fig. 8. — Evolution proportionnelle du nombre de têtes de bétail dans la zone d'étude de 1961 à 2005 (1961 = 100) (d'après FAO 2006a). Bovins : 1961 = 16,6 10⁶ ; ovins : 1961 = 13,7 10⁶ ; caprins : 1961 = 16,3 10⁶.

Cette augmentation considérable du troupeau, additionnée au fait que la surface d'approvisionnement des troupeaux se soit réduite lors de la longue sécheresse par simple aridification ainsi que par la 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 et laissant place soit à des sols fortement à totalement dénudés, soit à une nouvelle végétation, c'est-à-dire à des végétaux non consommables, à une prolifération d'espèces buissonnantes et non fourragères et à une augmentation des espèces annuelles, éphémères aux dépens de la régénération naturelle comme le fait remarquer MAINGUET (1990). 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 parmi lesquels la déflation éolienne.

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 jusque l'arbre entier, tuant celui-ci 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 FABREGUES 1990). Les caprins sont également friands des feuilles de certains arbres, ce qui présente un autre risque pour ces espèces arbustives.

Un autre effet néfaste du cheptel est le piétinement des sols. Cela peut empêcher la régénération de jeunes pousses (BOUGERE 1979) et peut provoquer la réactivation de certains sols jusqu'alors protégés de l'érosion éolienne grâce, par exemple, à des croûtes superficielles (TRICART 1959).

Du surpâturage, il en résulte une dégradation non seulement de la couverture végétale du sol, mais également une forte réduction de la biodiversité (KHETTELI 1995, MARGARIS *et al.* 1996, MYERS 1996).

Débat sur la désertification : discussion

Le thème de la désertification a toujours fait rage entre les sceptiques et les convaincus. Au début des années 1990, alors que THOMAS (1993) prétendait que ladite désertification n'était qu'une «tempête de sable dans une tasse de thé», MAINGUET (1991) martelait que la désertification était un processus «irréversible» dans bien des cas.

Plus récemment, et depuis le retour des précipitations 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 processus de désertification («la dégradation des sols en Afrique de l'Ouest sahélienne : est-ce sérieux?», NIEMEIJER & MAZZUCATO 2002) ou montrent un «reverdissement du Sahel» (EKLUNDH & OLSSON 2003). 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. Ceci prend une telle proportion que différents journaux organisent des numéros thématiques sur ce thème (*cf. Journal of Arid Environments*, 63 (3)).

L'analyse de ces différents papiers montre que chacun d'entre eux présente une dose élevée d'arguments pouvant être détricotés et réfutés avec une certaine facilité.

En effet, dans leur étude relative au nord du Burkina Faso, RASMUSSEN *et al.* (2001) ont suggéré, sur base d'une analyse diachronique de photographies aériennes et d'entretiens avec quelques éleveurs, que la désertification était en

recul depuis les années 1980. Cependant, 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. Mais ceci pose question car les auteurs omettent de signaler que cette même zone était couverte par une savane arbustive ou arborée durant les années 1950 (LINDQVIST & TENGBERG 1994). Le fait que le *Leptadenia pyrotechnica*, espèce typiquement saharienne (ARBONNIER 2002), recolonise de manière monospécifique et grégaire des sols sableux totalement dégradés n'est pas une surprise. Cela s'explique uniquement par le fait qu'elle ne soit pas appâtée par le 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 que le signe d'une dégradation accrue de l'environnement sahélien et que son extension n'est que consécutive aux vagues de sécheresse, au surpâturage et à la destruction des ressources forestières. 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 zones fortement dégradées sur des sols d'épandage limono-sableux (ARBONNIER 2002). Ici aussi, cette colonisation grégaire, le plus souvent monospécifique, peut se faire car cette plante est toxique pour les animaux et représente un piètre bois de feu. 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 & MORANT 2003). Finalement, il n'est pas inutile de signaler que les auteurs de cette étude 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, par contre, ne se sont pas privés de citer leur étude en globalisant leur conclusion à tout le Sahel.

NIEMEIJER & 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, si une localité n'est pas l'autre, un pays n'est pas systématiquement représentatif de toute une région. D'une part, leurs mesures de qualité des sols ont été vivement contestées (KOOHAFKAN 2002). D'autre part, 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 1961-2004 (figs 9, 10).

La figure 9 montre clairement que les évolutions des superficies cultivées sont radicalement différentes selon le pays étudié. Si le Burkina Faso a connu une augmentation de 77 % des superficies cultivées de mil, cet accroissement est de 205 % au Niger. D'autre part, si les rendements ont connu un accroissement de

87 % au Burkina Faso au cours des quarante-quatre dernières années, ce même rendement s'est déprécié de 17 % au Niger (fig. 10).

D'autres études vont dans le sens de la dégradation des rendements. Dans l'Arrondissement de Dakoro (Niger), MORTIMORE *et al.* (2001) ont également montré une augmentation de près de 400 % des superficies cultivées de mil entre 1979 et 1998, alors que les rendements se sont réduits de l'ordre de 25 %. Ailleurs, dans le sud-ouest du Burkina Faso, GRAY & MORANT (2003) rapportent que plus de 55 % des agriculteurs interrogés estiment que la fertilité de leurs sols s'est appauvrie au cours des dernières années, alors qu'aucun d'entre eux ne per-

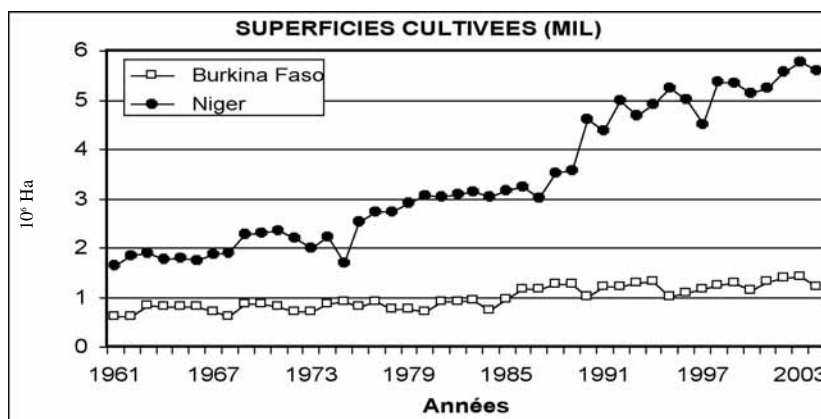


Fig. 9. — Evolution des superficies cultivées de mil au Burkina Faso et au Niger, de 1961 à 2004 (d'après FAO 2006a).

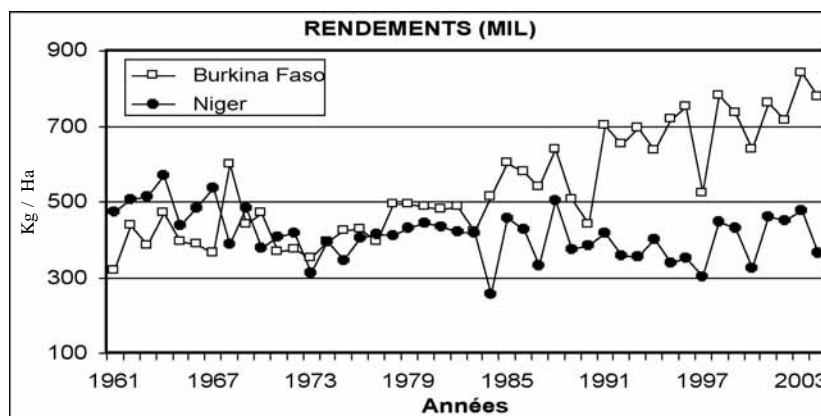


Fig. 10. — Evolution du rendement du mil au Burkina Faso et au Niger, de 1961 à 2004 (d'après FAO 2006a).

çoit une amélioration. Par ailleurs, 62 et 65 % de ces mêmes agriculteurs ont répondu que les cultures de coton et de maïs avaient connu une baisse significative de rendement.

Cette étude, quoique décriée, est également citée systématiquement par les sceptiques vis-à-vis de la désertification.

Enfin, l'étude de EKLUNDH & OLSSON (2003), qui introduit la notion de reverdissement du Sahel, est basée uniquement sur l'analyse de l'indice de végétation (NDVI) du Pathfinder 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 est contemporain du paroxysme du déficit pluviométrique de la grande sécheresse (fig. 2) ! Cette même remarque a été récemment formulée par ANYAMBA & 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 suggéré par RASMUSSEN *et al.* (2001) et NIEMEIJER & MAZZUCATO (2002). Or, des études ultérieures menées au Niger, au Burkina Faso et 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 (HOUNTONDI *et al.* 2005, 2006a, 2006b). Ceci montre que la bonification anthropique des terres n'est jamais qu'un épiphénomène, alors que la dégradation environnementale d'origine humaine est bien présente dans près d'un cas sur deux.

Conclusion

La désertification reste une grande problématique. Bien plus pour ceux qui en subissent les affres au quotidien que pour les scientifiques qui alimentent la polémique. Ces derniers, dans le cadre du *Millennium 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). Mais, y avait-il un Sahélien dans les personnes consultées ? Non, la réalité est que les recherches menées sur la désertification au Sahel sont réalisées à près de 90 % par des chercheurs américains ou européens qui parfois n'ont jamais posé un pied en Afrique de l'Ouest, sinon furtivement.

Et pendant ce temps, plusieurs indicateurs restent désespérément dans le rouge. La fréquence et l'intensité des lithométéores, considérés comme un indicateur de désertification, ont augmenté de manière extraordinaire au cours des cinquante dernières années (OZER 2000, 2003) et leur présence régulière menace la santé humaine (OZER 2005, OZER *et al.* 2006). Les déplacements des réfugiés environnementaux s'amplifient chaque jour. Le nombre de Nigériens travaillant

les terres dans le nord du Bénin augmente chaque année, participe à la dégradation accélérée des terres, et commence à créer des tensions parfois vives entre autochtones et allochtones (HOUNTONDI & OZER 2006). En mars 2006, cinq cent mille personnes se massaient le long des côtes mauritaniennes pour tenter d'atteindre les îles Canaries et leur rêve d'Europe. Et ce n'est qu'un début car, selon les Nations Unies, près de soixante millions de personnes quitteront les zones arides subsahariennes affectées par la désertification pour l'Afrique du Nord et l'Europe d'ici à 2020 (OZER 2006).

Quoi de plus étonnant? En considérant l'ensemble des pays sahéliens, il s'avère que la production céréalière totale par habitant s'est dégradée avec le temps (fig. 11), ce qui rend les populations sahéliennes toujours plus vulnérables aux caprices de la nature. Sachant que la population sahélienne devrait encore doubler d'ici à 2030, 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 une question de mauvaise conjoncture mais devient progressivement structurel. Le tableau 2 présente le nombre de millions d'individus souffrant de sous-alimentation durant diverses périodes au Sahel et au Niger. Les informations sur le Niger sont spécifiquement présentées car permettent une comparaison avec l'indice d'anomalie pluviométrique (IAP) calculé pour ce pays (fig. 1). Il apparaît que le nombre de sous-alimentés au Sahel est passé de 10,6 millions durant les premières années de sécheresse (1969-1971) à 14,5 millions ces dernières années. Le cas du Niger est plus illustratif. En 1969-1971, ils étaient 1,6 millions à souffrir de sous-alimentation alors que les pluies connaissaient un IAP de - 0,60. Vingt-cinq ans plus tard, un déficit pluviométrique similaire entraînait près de quatre millions d'individus dans la spirale de la sous-alimentation. Au début des années 2000, ils étaient encore 3,7 millions de sous-alimentés alors que les précipitations étaient redevenues normales.

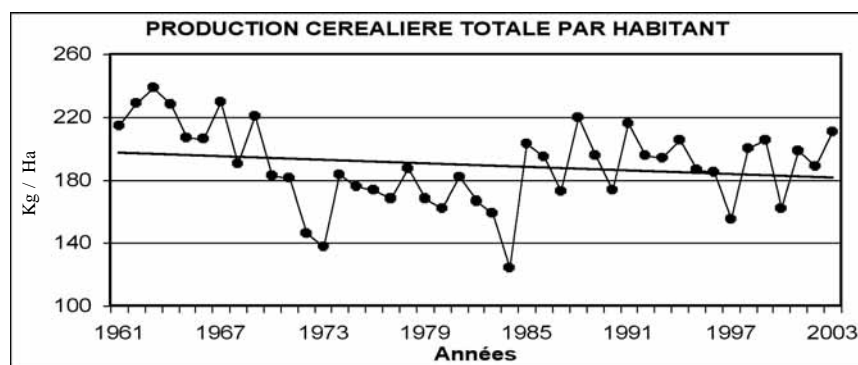


Fig. 11. — Evolution de la production céréalière totale par habitant au Sahel de 1961 à 2003 (d'après FAO 2006a).

Tableau 2

Evolution du nombre de personnes (millions) sous-alimentées au Sahel et au Niger.
Comparaison avec l'indice d'anomalie pluviométrique (IAP) calculé pour le Niger

	1969-1971	1979-1981	1990-1992	1995-1997	2001-2003
Sous-alimentation, Sahel	10,6	15,6	13,4	15,2	14,5
Sous-alimentation, Niger	1,6	1,9	3,2	3,9	3,7
IAP - Niger	- 0,60	- 0,38	- 0,34	- 0,57	0,00

BIBLIOGRAPHIE

- ANYAMBA, A. & TUCKER, C. J. 2005. Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981–2003. — *Journal of Arid Environments*, **63** : 596-614.
- ARBONNIER, M. 2002. Arbres, arbustes et lianes des zones sèches de l'Afrique de l'Ouest. — Pony-sur-Yonne, France, CIRAD – MNHN.
- ARIORI, S. L. & OZER, P. Evolution des ressources forestières en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne au cours des 50 dernières années. — *GEO-ECO-TROP* (soumis).
- BECHLER-CARMAUX, N., MIETTON, M. & LAMOTTE, M. 1999. Le risque de pénurie en eau potable dans la ville de Niamey (Niger). — *Sécheresse*, **10** : 281-288.
- BOUGERE, J. 1979. L'état de la dégradation des formations sableuses du Sahel voltaïque ou l'urgence d'une intervention. — *Travaux de l'Institut de Géographie de Reims*, **39-40** : 91-101.
- BOUREIMA, A. G. 1992. Concepts traditionnels sur les sécheresses, famines et épidémies du Sahel. — *Sécheresse*, **3** : 243-250.
- BRONDEAU, F. 2001. Evolution de la filière bois énergie et dynamique des formations ligneuses autour de l'Office du Niger. — *Bois et Forêts des Tropiques*, **270** : 15-33.
- BUGAJE, I. M. 2006. Renewable energy for sustainable development in Africa : a review. — *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **10** : 603-612.
- CHAMARD, P. C. & COUREL, M. F. 1999. La forêt sahélienne menacée. — *Sécheresse*, **10** : 11-18.
- CHAMPAUD, J., CHAUME, R., DESSAY, N., DIARRA, B. & SIMEU KAMDEM, M. 1998. Analyse comparée de la dynamique spatiale des villes de Bamako (Mali) et Garoua (Cameroun) à partir d'images satellitaires et de données auxiliaires. — In : DUBOIS, J. M. M., BERNIER, M., FORTIN, J. P. & BOIVIN, F. (éds), La réalité de terrain en télé-détection : pratiques et méthodes. AUPELF-UREF, pp. 217-224.
- CHIPPAUX, J. P., HOUSSIER, S., GROSS, P., BOUVIER, C. & 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., TRENBERTH, K. E. & KARL, T. R. 1998. Global variations in droughts and wet spells : 1900-1995. — *Geophysical Research Letters*, **25** : 3367-3370.
- DAI, A., LAMB, P. J., TRENBERTH, K. E., HULME, M., JONES, P. D. & XIE, P. 2004. The Recent Sahel drought is real. — *Int. J. Climatol.*, **24** : 1323-1331.

- DAOUDA, M., OZER, P. & ERPICUM, M. 1998. Conséquences de la sécheresse sur la longueur et l'amplitude de la saison des pluies au Niger. — *In* : DEMAREE, G., ALEXANDRE, J. & DE DAPPER, M. (eds.), *Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology in Memoriam Franz Bultot (1924-1995)*. Royal Meteorological Institute of Belgium / Royal Academy of Overseas Sciences, pp. 497-506.
- DAVENPORT, M. L. & NICHOLSON, S. E. 1993. On the relation between rainfall and Normalized Difference Vegetation Index for diverse vegetation types in East Africa. — *Int. J. Rem. Sens.*, **12** : 2369-2389.
- DEMAREE, 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.
- DIARRA, B. & CHAMPAUD, J. 2000. Impact de la croissance spatiale de Bamako sur celle des localités périurbaines : l'apport des images HRV de SPOT pour le suivi de leur dynamique comparée. — *In* : DUBOIS, J. M. M., CALOZ, R. & GAGNON, P. (éds), *La télédétection en francophonie : analyse critique et perspectives*. AUPELF-UREF, pp. 49-59.
- DIOP, M., HOUNDENOU, C. & RICHARD, Y. 1996. Variabilité des dates de début et de fin de l'hivernage au Sénégal (1950-1991). — *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, **9** : 430-436.
- DIOUF, A. & LAMBIN, E. F. 2001. Monitoring land-cover changes in semi-arid regions : remote sensing data and field observations in the Ferlo, Senegal. — *J. Arid Environ.*, **48** : 129-148.
- DREGNE, H. E. & CHOU, N. T. 1992. Global Desertification : Dimensions and Costs. — *In* : DREGNE, H. E. (ed.), *Degradation and restoration of arid lands*. Lubbock, Texas, Texas Tech University, 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. & OLSSON, L. 2003. Vegetation index trends for the African Sahel 1982-1999. — *Geophys. Res. Lett.*, **30** (8) : 1430 ; 10.1029/2002GL016772.
- ERPICUM, M., BINARD, M., PETERS, J. P. & ALEXANDRE, J. 1988. Une méthode d'analyse des caractéristiques de la saison des pluies en région sahélienne (exemples pris au Sénégal). — *In* : ERPICUM, M. (éd.), *Actes des Journées de Climatologie (Mont-Rigi, Belgique, 5-7 novembre 1987)*. Presses Universitaires de Liège, pp. 43-56.
- FAO 1993. *Forest Resources Assessment 1990 — Tropical countries*. — Rome, Italy, FAO Forestry Paper No. 112.
- FAO 1999. *State of the world's forests 1999*. — Rome, Italy, FAO.
- FAO 2001. *State of the world's forests 2001*. — Rome, Italy, FAO Forestry Paper No. 140.
- 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 2006a. FAOSTAT : FAO Statistical Databases. <http://faostat.fao.org/>, dernier accès le 22 mars 2006.
- FAO 2006b. *Global Forest Resources Assessment 2005*. — Rome, Italy, FAO Forestry Paper No. 147.
- FOLEY, G., KERKHOF, P. & MADOUYOU, D. 2002. A review of the rural firewood market strategy in West Africa. — World Bank Africa Region, Working Paper Series No. 35.

- FOURNIER, I. 1987. Permanence de la sécheresse dans la région de Gao et évolution de la société Tamacheq : 1969-1984. — *Cahiers Géographiques de Rouen*, **28** : 31-38.
- GALLAIS, J. 1988. Sécheresse sahélienne – Migrations intérieures et perspectives au Mali. — *Cahiers Géographiques de Rouen*, **30** : 35-51.
- GAUTIER, F., LUBES-NIEL, H., SABATIER, R., MASSON, J. M., PATUREL, J. E. & SERVAT, E. 1998. Variabilité du régime pluviométrique de l'Afrique de l'Ouest non sahélienne entre 1950 et 1989. — *Hydrological Sciences Journal*, **43** : 921-935.
- GEIST, H. J. & 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. & TUCKER, C. J. 2004. Local knowledge and remote sensing of forest biodiversity and forest carbon across the Sahel. — *In* : LYKKE, A. M., DUE, M. K., KRISTENSEN, M. & NIELSEN, I. (eds.), *The Sahel*. Copenhagen, Denmark, Institute of Geography, SEREIN Occasional Paper No. 17, pp. 23-37.
- GOUDIE, A. S. 1996. Climate : Past and present. — *In* : ADAMS, W. M., GOUDIE, A. S. & ORME, A. R. (eds.), *The physical Geography of Africa*. New York, Oxford University Press, pp. 34-59.
- GRAY, L. C. & 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. & RASUVAEV, V. N. 2005. Trends in intense precipitation in the climate record. — *Journal of Climate*, **18** : 1326-1350.
- GUEYE, M. & SIVAKUMAR, M. V. K. 1992. Analyse de la longueur de la saison culturale en fonction de la date de début des pluies au Sénégal. — Niamey, Niger, Centre Sahélien de l'Icrisat, Compte rendu des travaux n° 2, 42 pp.
- 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.
- HENS, L. & BOON, E. K. 1999. Institutional, legal and economic instruments in Ghana's environmental policy. — *Environmental Management*, **24** : 337-351.
- HIERNAUX, P. & TURNER, M. D. 2002. The influence of farmer and pastoralist management practices on desertification processes in the Sahel. — *In* : REYNOLDS, J. F. & STAFFORD SMITH, D. M. (eds.), *Global desertification : Do humans cause deserts?* Dalthem, Dalthem University Press, pp. 135-148.
- HOUGHTON, J. T., DING, Y., GRIGGS, D. J., NOGUER, M., VAN DER LINDEN, P. J., DAI, X., MASKELL, K. & JOHNSON, C. A. 2001. *Climate Change 2001 : The Scientific Basis*. — Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- HOUNTONDJI, Y. C., NICOLAS, J., SOKPON, N. & OZER, P. 2005. Mise en évidence de la résilience de la végétation sahélienne par télédétection basse résolution au Niger à la suite d'épisodes de sécheresse. — *BELGEO*, **4** : 499-516.
- HOUNTONDJI, Y. C. & OZER, P. 2006. Une menace sérieuse pour le Bénin septentrional : la désertification. — *Le Point au Quotidien*, Bénin (14 avril 2006).
- HOUNTONDJI, Y. C., SOKPON, N. & OZER, P. 2006a. Analysis of the vegetation trends using low resolution remote sensing data in Burkina Faso (1982-1999) for the monitoring of desertification. — *International Journal of Remote Sensing*, **27** (5) : 871-884.

- HOUNTONDJI, Y. C., SOKPON, N. & OZER, P. 2006b. Analysis of the vegetation trends using low resolution remote sensing data in the Sahel (1982-1999) for the monitoring of desertification. — *In* : RODER, A. & HILL, J. (eds.), Proceedings of the 1st International Conference on Remote Sensing and Geoinformation Processing in the Assessment and Monitoring of Land Degradation and Desertification. Germany, University of Trier, Remote Sensing Department, pp. 167-174.
- HUFTY, A. 1994. Orientations et vocabulaire de la climatologie (1988-1992). — *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, **7** : 15-23.
- HULME, M. 1992. Rainfall changes in Africa : 1931-1960 to 1961-1990. — *International Journal of Climatology*, **12** : 685-699.
- HULME, M. 1996. Recent climatic change in the world's drylands. — *Geophysical Research Letters*, **23** : 61-64.
- JANZEN, D. H. 1998. Tropical dry forests : the most endangered major tropical ecosystem. — *In* : WILSON, E. O. (ed.), Biodiversity. Washington, National Academy Press, pp. 130-137.
- JONES, P. D. & 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. — Université de Liège, Faculté des Sciences, Thèse de doctorat en Sciences géographiques, 350 pp.
- KHETTELI, H. 1995. L'érosion éolienne sur un terrain de parcours dégradé par le surpâturage dans le sud tunisien (cas de Menzel El Habib) : analyse des processus et proposition d'un moyen de lutte. — *Revue Tunisienne de Géographie*, **28** : 155-172.
- 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.
- LAMB, P. J. 1982. Persistence of subsaharan drought. — *Nature*, **299** : 46-48.
- LEPERS, E., LAMBIN, E. F., JANETOS, A. C., DEFRIES, R., ACHARD, F., RAMANKUTTY, N. & SCHOLLES, R. J. 2005. A synthesis of information on rapid land-cover change for the period 1981-2000. — *BioScience*, **55** : 115-124.
- L'HOTE, T., MAHE, G., SOME, B. & TRIBOULET, J. P. 2002. Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000 ; the drought continues. — *Hydrological Sciences Journal*, **47** : 563-572.
- LINDQVIST, S. & TENGBERG, A. 1994. New evidence of desertification from case studies in northern Burkina Faso. — *Desertification Control Bulletin*, **25** : 54-60.
- LOPEZ BERMUDEZ, F. 1994. Désertification et migration. — *Sécheresse*, **5** : 276-277.
- MAHE, G., PATUREL, J. E., SERVAT, E., CONWAY, D. & DEZETTER, A. 2005. The impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modelling in the Nakambe River, Burkina-Faso. — *J. Hydrol.*, **300** : 33-43.
- 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. — Berlin, Springer-Verlag, 306 pp.
- MALEY, J. 1973. Mécanisme des changements climatiques aux basses latitudes. — *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **14** : 193-227.

- MARGARIS, N. S., KOUTSIDOU, E. & GIOURGA, C. 1996. Changes in traditional Mediterranean land-use systems. — *In* : BRANDT, C. J. & THORNES, J. B. (eds.), *Mediterranean Desertification and Land Use*. Chichester, Wiley, pp. 29-42.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment) 2005. *Ecosystems and human well-being : Desertification Synthesis*. — Washington DC, World Resources Institute.
- MOREL, R. 1996. Evaluation des sécheresses en Afrique de l'Ouest. — *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, **9** : 145-152.
- MOREL, R. 1998. Début de la sécheresse en Afrique de l'Ouest. — *In* : DEMAREE, G., ALEXANDRE, J. & DE DAPPER, M. (eds.), *Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology in Memoriam Franz Bultot (1924-1995)*. Royal Meteorological Institute of Belgium / Royal Academy of Overseas Sciences, pp. 200-211.
- MORTIMORE, M., TIFFEN, M., BOUBACAR, Y. & NELSON, J. 2001. Synthesis of long-term change in Maradi Department, Niger, 1960-2000. — Somerset (UK), Drylands Research, Drylands Research Working Paper 39^e, 52 pp.
- MYERS, N. 1996. Biodiversity and biodepletion. — *In* : ADAMS, W. M., GOUDIE, A. S. & ORME, A. R. (eds.), *The physical geography of Africa*. New York, Oxford University Press, pp. 356-366.
- 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. 1989. Long-term changes in African rainfall. — *Weather*, **44** : 44-56.
- NICHOLSON, S. E. 1996. Environmental change within the historical period. — *In* : ADAMS, W. M., GOUDIE, A. S. & ORME, A. R. (eds.), *The physical geography of Africa*. New York, Oxford University Press, pp. 60-87.
- NICHOLSON, S. E. 1998. Interannual and interdecadal variability of rainfall over the African continent during the last two centuries. — *In* : SERVAT, E., HUGUES, D., FRITSCH, J. M. & HULME, M. (eds.), *IAHS Publication N° 252*, pp. 107-116.
- NICHOLSON, S. 2005. On the question of the "recovery" of the rains in the West African Sahel. — *Journal of Arid Environments*, **63** : 615-641.
- NIEMEIJER, D. & 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. & SOMBROEK, W. G. 1991. World map of the status of human-induced soil degradation : an explanatory note. — Wageningen/Nairobi, International Soil Reference and Information Centre/United Nations Environment Programme (second revised edition).
- OLSSON, L., EKLUNDH, L. & ARDO, J. 2005. A recent greening of the Sahel — trends, patterns and potential causes. — *J. Arid Environ.*, **63** : 556-566.
- OUALLET, A. 1987. Gao : Indicateur urbain de la crise sahélienne. — *Cahiers Géographiques de Rouen*, **28** : 39-45.
- OZER, P. 2000. Les lithométéores en région sahélienne : un indicateur climatique de la désertification. — *GEO-ECO-TROP*, **24** : 1-317.
- OZER, P. 2003. Fifty years of African mineral dust production. — *Bulletin des Séances de l'Académie Royale des Sciences d'Outre-Mer*, **49** (3) : 371-393.
- OZER, P. 2004. Bois de feu et déboisement au Sahel : mise au point. — *Sécheresse*, **15** : 243-251.

- OZER, P. 2005. Estimation de la pollution particulaire naturelle de l'air en 2003 à Niamey (Niger) à partir de données de visibilité horizontale. — *Environnement, Risques & Santé*, **4** : 43-49.
- OZER, P. 2006. Déserts, poussières et migrations. — *Le Monde* (24 janvier 2006).
- OZER, P. & ERPICUM, M. 1995. Méthodologie pour une meilleure représentation spatio-temporelle des fluctuations pluviométriques observées au Niger depuis 1905. — *Sécheresse*, **6** : 103-108.
- OZER, P., BODART, C. & TYCHON, B. 2005. Analyse climatique de la région de Gouré, Niger oriental : récentes modifications et impacts environnementaux. — *Cybergeographie : Revue Européenne de Géographie*, **308**, 24 pp. (<http://www.cybergeographie.presse.fr>)
- OZER, P., ERPICUM, M., DEMAREE, G. & VANDIEPENBEECK, M. 2003. The Sahelian drought may have ended during the 1990s. — *Hydrol. Sc. J.*, **48** : 489-492.
- OZER, P., OULD MOHAMED LAGHDAF, M. B., OULD MOHAMED LEMINE, S. & GASSANI, J. 2006. Estimation of air quality degradation due to Saharan dust at Nouakchott, Mauritania, from horizontal visibility data. — *Water, Air & Soil Pollution* (in press).
- PATUREL, J. E., SERVAT, E., DELATTRE, M. O. & 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.
- PITTE, J. R. 1975. La sécheresse en Mauritanie. — *Annales de Géographie*, **466** : 641-664.
- QUEZEL, P. 1965. La végétation au Sahara. Du Tchad à la Mauritanie. — Stuttgart, Germany, Gustav Fischer Verlag.
- RASMUSSEN, K., FOG, B. & 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. & RISER, J. 1991. L'ensablement de Nouakchott : exemple de l'aéroport. — *Sécheresse*, **2** : 101-109.
- SENE, S. & OZER, P. 2002. Evolution pluviométrique et relation inondations — événements pluvieux au Sénégal. — *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, **42** : 27-33.
- SENE, S. & OZER, P. 2004. Are the 1999 and 2000 urban floods in Senegal due to exceptional rainfall events? — In : DEMAREE, G., DE DAPPER, M. & ALEXANDRE, J. (eds.), Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology : Climate-related risk analysis and sustainable development in tropical areas. Royal Meteorological Institute of Belgium / Royal Academy of Overseas Sciences, pp. 345-351.
- SIRCOULON, J. 1976. Les données hydropluviométriques 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. & CUSHING, M. 2004. Ecoregions and land cover trends in Senegal. — *Journal of Arid Environments*, **59** : 427-462.
- TARHULE, A. 2005. Damaging rainfall and flooding : the other Sahel hazards. — *Climatic Change*, **72** : 355-377.

- TARHULE, A. & WOO, M. 1998. Changes in rainfall characteristics in northern Nigeria. — *International Journal of Climatology*, **18** : 1261-1271.
- THOMAS, D. S. G. 1993. Sandstorm in a teacup? Understanding desertification. — *The Geographical Journal*, **159** : 318-331.
- THOMAS, D. S. G. & MIDDLETON, N. J. 1994. Desertification : Exploding the Myth. — Chichester, Wiley, 194 pp.
- 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] 2006. World Population Prospects : The 2004 Revision and World Urbanization Prospects : The 2003 Revision. <http://esa.un.org/unpp>, dernier accès le 29 mars 2006.
- VAN DEURSEN, W., BAGRE, A., DE JONG, S. & VAN TEEFFELLEN, P. 1999. Monitoring trends in urban growth : Ouagadougou, Burkina Faso. — Delft, The Netherlands, Beleidscommissie Remote Sensing, NRSP-2, 53 pp.
- VAN GOMPEL, B. & DECLAIR, H. 1998. Further characteristics of climate change in the Sahel region and West Africa. — In : DEMAREE, G., ALEXANDRE, J. & DE DAPPER, M. (eds.), Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology in *Memoriam Franz Bultot (1924-1995)*. Royal Meteorological Institute of Belgium / Royal Academy of Overseas Sciences, pp. 263-278.
- VANNITSEM, S. & DEMAREE, 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 : LYKKE, A.M., DUE, M.K., KRISTENSEN, M. & NIELSEN, I. (eds.), *The Sahel*. Copenhagen, Denmark, Institute of Geography, SEREIN Occasional Paper No. 17, pp. 37-52.
- World Bank 2003. World development report 2003 : Sustainable development in a dynamic world : transforming institutions, growth, and quality of life. — New Delhi, Oxford University Press.
- WWW1 <http://www.citypopulation.de/Senegal.html>, dernier accès le 20 avril 2006.
- WWW2 <http://www.citypopulation.de/Niger.html>, dernier accès le 20 avril 2006.
- YERGEAU, M., BIENE, B.G., BONN, F. & PREVOST, C. 1991. Satellite et gestion de l'eau au Sahel. — *Sécheresse*, **2** : 48-60.