

Analyse climatique de la région de Gouré, Niger oriental : récentes modifications et impacts environnementaux

Climatic analysis of the Gouré area, eastern Niger: recent changes and environmental impacts

Pierre OZER¹, Catherine BODART² et Bernard TYCHON¹

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

²Département de Géographie, Université de Liège
BAT. B11, allée du 6 Août, 2, B-4000 Liège, Belgique

Résumé :

Depuis la fin des années 1960, la région sahélienne est touchée par une terrible sécheresse. Cet article analyse les variations climatiques enregistrées dans la région de Gouré, Niger oriental, entre 1936 et 2003. Il apparaît que la zone étudiée est sortie de la « Grande Sécheresse » à la fin des années 1980. Cependant, les conséquences de ce retour à des conditions plus humides ne se serait pas accompagné d'une amélioration significative de la longueur de la saison des pluies. En ce qui concerne l'analyse des vents, il appert que la station synoptique de Gouré n'a reporté des données cohérentes que durant les deux premières années complètes de sa mise en fonction (1984 et 1985). Par la suite, la vitesse du vent a été biaisée suite à l'absence d'entretien de l'anémomètre et les mesures se sont définitivement arrêtées dès 1997. Le pire est que les stations voisines connaissent le même destin depuis plusieurs années et qu'il n'y a donc plus de données de vent disponibles pour le Niger oriental. Sur base des vents mesurés et des cas de déflation observés simultanément durant 1984, nous avons pu déterminer que la vitesse limite du vent efficace est 7 m/s. Finalement, à partir des mesures de visibilité horizontale réduite par des poussières minérales (lithométéores), nos résultats suggèrent que la qualité de l'air est fortement dégradée suite aux processus d'érosion éolienne. La confrontation des nos résultats avec de récentes études environnementales dans la région suggère que le retour des pluies ne s'est pas accompagné par une amélioration paysagère. La pression anthropique croissante paraît être actuellement le véritable moteur de la dégradation des ressources naturelles.

Mots-clés : évolution climatique, sécheresse, dégradation environnementale, Sahel, Niger

Abstract :

Since the late 1960s, the Sahel is affected by a dramatic drought. This article analyses climatic variations recorded in the Gouré area, eastern Niger, between 1936 and 2003. It appears that the drought ended in the late 1980s. However, the rainfall increase did not lead to an extension of the length of the rainy season. The study of the wind shows that correct data were recorded during the two first years of the station of Gouré (1984 and 1985). Afterwards, wind speed was entached by errors and did not report since 1997. The situation is alarming as we know that neighbouring stations meet the same problems and that no synoptic station currently reports wind values in eastern Niger. However, based on wind speed and deflation data recorded in 1984, a threshold wind speed of 7 m/s was determined in Gouré. Finally, from measurements of horizontal visibility reduced by mineral dust, our results suggest that air quality is reduced because of the high frequency of wind erosion. The confrontation of our results with recent environmental studies in that region show that the end of the drought did

not lead to any landscape improvement. Increasing human pressure tends to be the main driving factor of land degradation.

Keywords : climatic evolution, drought, environmental degradation, Sahel, Niger

Préambule

Ce travail s'inscrit dans le Programme Interuniversitaire Ciblé (PIC) intitulé « Envahissement des cuvettes par apports éoliens : processus, impacts et moyens de lutte ». Ce projet, financé par la Coopération Universitaire au Développement (CUD), rassemble les compétences d'universités belges (Université de Liège, Université catholique de Louvain, Faculté universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux) et nigérienne (Université Abdou Moumouni de Niamey). L'objectif du projet est d'étudier la problématique de l'ensablement des cuvettes dans la région de Gouré, située au sud-ouest du Niger. Dans cette région environnementale fragile, les cuvettes, dépressions interdunaires alimentées en eau par des nappes phréatiques subaffleurantes, sont menacées de disparition suite à la conjugaison de conditions climatiques défavorables et d'actions anthropiques adverses.

Cette étude a pour dessein d'analyser les caractéristiques climatiques de la région de Gouré (Fig. 1) qui influent sur l'érosion éolienne en zone semi-aride. Après une brève introduction décrivant les changements environnementaux de ces dernières décennies et le contexte de la « Grande Sécheresse », l'évolution de la pluviométrie et des vents sera analysée avant d'estimer la vitesse limite à partir de laquelle le vent devient efficace (c'est-à-dire capable d'initier le processus d'érosion éolienne). L'analyse se clôturera avec l'estimation de la quantité de poussières dans l'air suite à ces épisodes de phénomènes éoliens.

Les différentes données climatiques utilisées dans ce travail proviennent de la station synoptique de Gouré (10°18' E, 13°59' N) et ont été collectées auprès de la Direction de la Météorologie Nationale du Niger à Niamey lors de notre mission de terrain en mars 2004.

1 Introduction

1.1 *Le bouleversement environnemental des dernières décennies*

Très longtemps, il a été admis que la limite méridionale des dunes mobiles correspondait approximativement à l'isohyète de 150 mm (Grove, 1958).

Dans notre zone d'étude, les dunes héritées de l'époque ogolienne [20 000 à 12 500 B.P.] (Rognon 1991) ont été décrites, durant les années 1950, comme étant fixées par la végétation (Capot-Rey, 1952 ; Grove, 1958). Au début des années 1970, Wilson (1971, 1973) décrivait toujours ces formations dunaires comme étant totalement fixées par la végétation. Quelques années plus tard, Mainguet *et al.* (1979) y ont établi une carte au 1 : 1 000 000 à partir d'une étude comparative d'images satellitaires Landsat (1975 à 1977) et de photographies aériennes (1955-56 et 1975) supportée par diverses campagnes de vérifications de terrain. Pour ces auteurs, la limite naturelle dunes vives / dunes vêtues était toujours l'isohyète de 150 mm. Les dunes étaient toujours reconnues comme fixées par la végétation et peu dégradées par les actions humaines dans la zone s'étendant de Zinder à Maine-Soroa. Actuellement, les dunes vives sont présentes sur près de 200 kilomètres entre Gouré et Maine-Soroa alors que la pluviométrie annuelle moyenne (1961-1990) est de l'ordre de 300 mm. Les infrastructures, routes et cuvettes, sont constamment menacés par l'avancée du sable. Par ailleurs, Herrmann et ses collègues (1997) ont mis en évidence que cette région était devenue depuis les années 1980 l'une des trois zones-source principales de poussières au sud de l'isohyète de 200 mm.

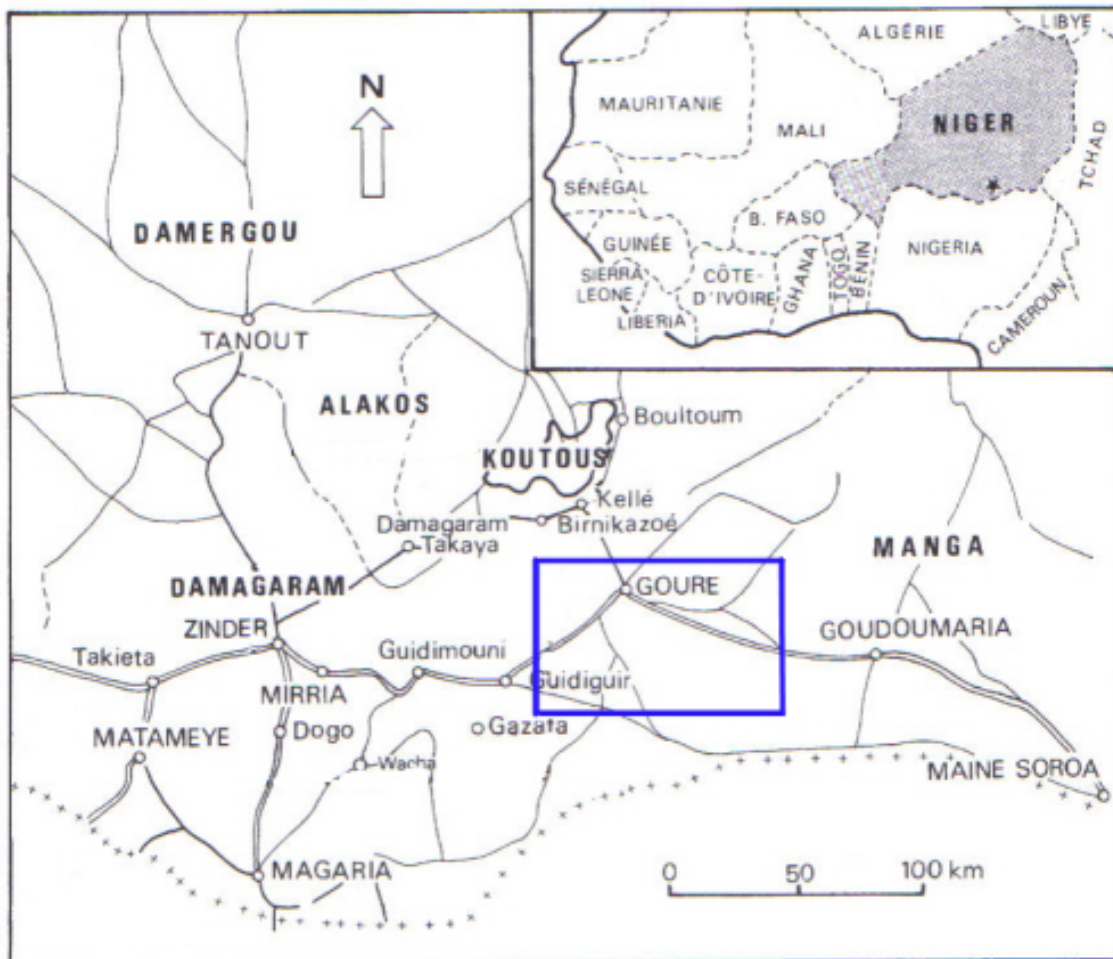


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude.

Pour Jahiel (1998), c'est la crise de sécheresse qui aurait modifié aussi bien le faciès environnemental que le comportement des populations locales dans la région des cuvettes de Goudoumaria et Maine-Soroa, une région légèrement à l'est de Gouré. Les effets combinés de ces deux actions auraient été palpables seulement à partir du début des années 1980 avec l'avènement de la deuxième période dramatique de sécheresse (1982-1987) qui, de manière générale, a entraîné :

- La baisse générale du niveau des nappes phréatiques réalimentées annuellement par les eaux de ruissellement et de drainage pendant la saison des pluies ;
- Une réduction ou modification floristique des surfaces pastorales utiles ;
- Une surexploitation des bas-fonds avec arrêt des jachères, conduisant le plus souvent à un appauvrissement, puis à une stérilisation des sols ;
- La disparition ou la raréfaction d'espèces ligneuses utiles pour l'alimentation, l'artisanat, la médecine, ...

Le tout conduisant irrémédiablement à la mise en place d'un processus de désertification se caractérisant par une détérioration interne du milieu et se manifestant, entre autres, par la remise en mouvement des dunes.

Notons finalement que notre région d'étude abritait une faune diversifiée aujourd'hui totalement disparue. Ainsi, en 1945, le Lieutenant Grall recensait les mammifères suivants au nord de Gouré : chacal, hyène, lion, lynx, girafe, antilope, gazelle, guépard, **etc.** **Il ajoute** également que le nombre de gazelles et d'antilopes étant énorme, les indigènes n'avaient aucun

mal à les chasser pour la qualité et la quantité de leur viande et de leur peau. Quant à l'éléphant, il était bien présent dans la région de Mainé Soroa jusqu'aux années 1950 (Mauny 1957, *in* Ojo 1977). Ajoutons également que les autruches y étaient présentes en abondance jusqu'à la fin des années 1960 (M. S. Karimoune, communication orale, 1998).

1.2 La « Grande Sécheresse »

La crise climatique qui a débuté à la fin des années 1960 a durement frappé les pays du Sahel. La transition vers cette sécheresse fut d'autant plus violente qu'elle succédait directement à la période la plus arrosée du siècle (Ozer & Erpicum 1995 ; L'Hôte *et al.*, 2002). Au Niger, la comparaison des isohyètes durant la période dite « humide » de 1950 à 1967 et la période de sécheresse de 1968 à 1985 met en évidence la diminution généralisée des précipitations qui se marque par un retrait important des courbes isohyètes vers le sud pouvant atteindre 200 kilomètres (Fig. 2).

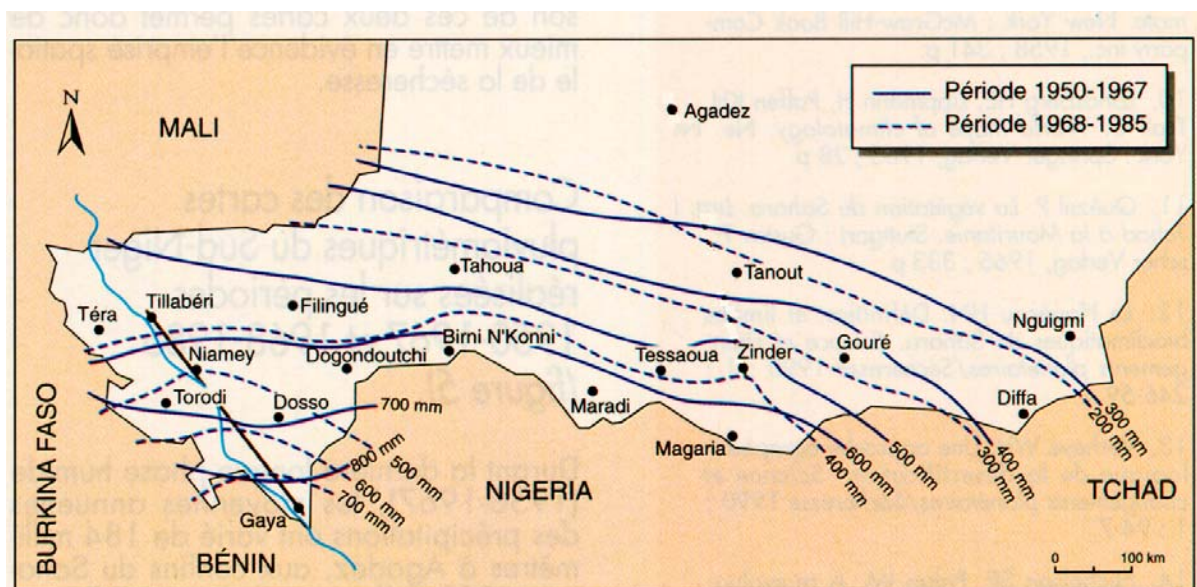


Figure 2 : Carte pluviométrique du sud Niger. Les isohyètes sont calculées sur la période dite « humide » (1950-1967) et la période de sécheresse (1968-1985) (OZER & ERPICUM 1995).

On peut noter que la courbe isohyète de 400 millimètres de la période 1968-1985 se superpose pratiquement à celle de 600 millimètres de la période précédente, ce qui souligne bien l'importance de la péjoration climatique des années 1970 et 1980. Plus grave encore est la situation dans l'est du Niger où plusieurs arrondissements, dont celui de Gouré, sont passés du Sahel à culture sous pluies (limite septentrionale de 300 mm) au Sahel dit pastoral. Même si des signes annonciateurs de la fin de la sécheresse pluviométrique qui sévit au Sahel depuis une trentaine d'années semblent visibles ces dernières années (Ozer *et al.*, 2003), l'environnement sahélien ne paraît se recouvrer que dans certaines conditions (Eklundh & Olsson, 2003 ; Hountondji *et al.*, 2004). Dans la zone de Gouré, après une forte dégradation environnementale (Karimoune, 1994) contemporaine de la « Grande Sécheresse », il semble que l'augmentation relative des précipitations n'ait fait qu'arrêter l'hémorragie, sans pour autant entraîner une amélioration environnementale notable (Bodart, 2004 ; Hountondji *et al.*, 2004). En l'absence de déficit pluviométrique important, la pression anthropique croissante paraît être actuellement le véritable moteur de la dégradation des ressources naturelles.

2 Analyse de la pluviométrie

L'analyse de la pluviométrie de la station de Gouré a été réalisée à partir des données pluviométriques quotidiennes disponibles depuis l'origine de la station (janvier 1936) à décembre 2003. Les données sont complètes à l'exception du mois de septembre 1944 pour lequel nous ne disposons que du total mensuel.

2.1 Evolution annuelle des précipitations

A partir des données disponibles à la station de Gouré, il est possible de mettre en évidence la non-stationnarité des séries pluviométriques survenue pendant la période 1936-2003. 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 Pettitt (1979), capable d'estimer la position d'un changement de moyenne (point de rupture) dans une série, a été appliqué à cette série pluviométrique.

Il ressort de l'application de ce test qu'un premier point de rupture hautement significatif (niveau α de probabilité $< 0,0001$) est identifié en 1967 et met en évidence le déficit pluviométrique des années 1970 et 1980. Ceci est en accord avec les travaux similaires relatifs à l'analyse, station par station, des séries pluviométriques sahéliennes (Carbonnel & Hubert 1985 ; Hubert & Carbonnel 1987 ; Demarée 1990 ; Vannitsem & Demarée 1991 ; Morel 1995, 1998). L'application du test aux sous-séries (1936-1967 et 1968-2003) détecte une seconde rupture significative ($\alpha = 0,036$) à la hausse en 1987 qui suggère que la « Grande Sécheresse » qui a affecté la région de Gouré a pris fin en 1987 et que, depuis 1988, un retour à des conditions plus humides est observé. Ces résultats confirment les récentes affirmations de Ozer *et al.* (2003).

La figure 3 présente la traduction de ces ruptures climatiques sur les précipitations de Gouré. Ainsi, la comparaison des moyennes des sous-séries pluviométriques homogènes avant et après les points de rupture montre l'ampleur de la transition brutale qui a caractérisé la « grande sécheresse ». Plus de 160 mm séparent les périodes 1936-1967 et 1968-1987 dont la pluviométrie moyenne est respectivement de 410 et 248 mm, soit un déficit pluviométrique de 40%. Notons que le changement pluviométrique est encore plus dramatique étant donné que les années 1950 ont constitué la décennie la plus arrosée de la série analysée comme en témoigne la moyenne centrée sur neuf ans (Figs. 3 et 4). En effet, plus de 230 mm séparent les années 1950 des années 1970. Par ailleurs, si la période 1988-2003 présente un retour à des précipitations plus abondantes, la moyenne pluviométrique de ces années constitue, avec 323 mm, un palier intermédiaire entre les valeurs des deux périodes précédentes.

A partir de la série des précipitations lissées sur neuf ans présentée à la figure 3, l'anomalie d'une succession des neuf années peut dès lors se définir par référence à une situation jugée normale et son intensité peut se mesurer en terme d'écart à la moyenne (Arléry *et al.*, 1973). Le seuil le plus souvent adopté est un écart type de part et d'autre de la valeur moyenne lissée sur neuf ans (Ozer & Erpicum, 1995), calculé sur la période centrée de 1940 à 1999. A Gouré (Fig. 4), les anomalies pluviométriques correspondent donc à :

- Une brève période humide de 1941 à 1942,
- Une longue période humide continue de dix années s'étendant de 1949 à 1958,
- Une longue période quasi ininterrompue présentant un large déficit pluviométrique de 1971 à 1988 avec deux vagues de sécheresse de 1971 à 1976 et de 1980 à 1988.

La figure 5 présente l'évolution annuelle des précipitations exprimée en fonction de l'indice d'anomalie pluviométrique développé par Lamb (1982), à savoir la différence entre pluviométrie annuelle et la pluviométrie moyenne divisée par l'écart type de la série analysée (1936-2003). La période « humide » (1936-1967) rassemble toutes les années à excédent pluviométrique (Fig. 5), avec huit années anormalement humides (pluviosité $> \text{moyenne} + \sigma$)

et trois années exceptionnellement pluvieuses (pluviosité $>$ moyenne $+ 2 \sigma$). Une seule année sur les 32 que compte la période humide, apparaît anormalement déficitaire (pluviosité $<$ moyenne $- \sigma$). Durant les vingt années de sécheresse (1968-1987), seules deux années ont été légèrement supérieures à la moyenne 1936-2003. Par contre, six années ont été affectées par une pluviométrie anormalement déficitaire et l'une, 1984 avec seulement 90 mm, fut excessivement sèche (pluviosité $<$ moyenne $- 2\sigma$). La période « actuelle » (1988-2003) est marquée par une majorité d'années s'écartant peu de la moyenne, avec néanmoins deux années marquées par un déficit pluviométrique anormal.

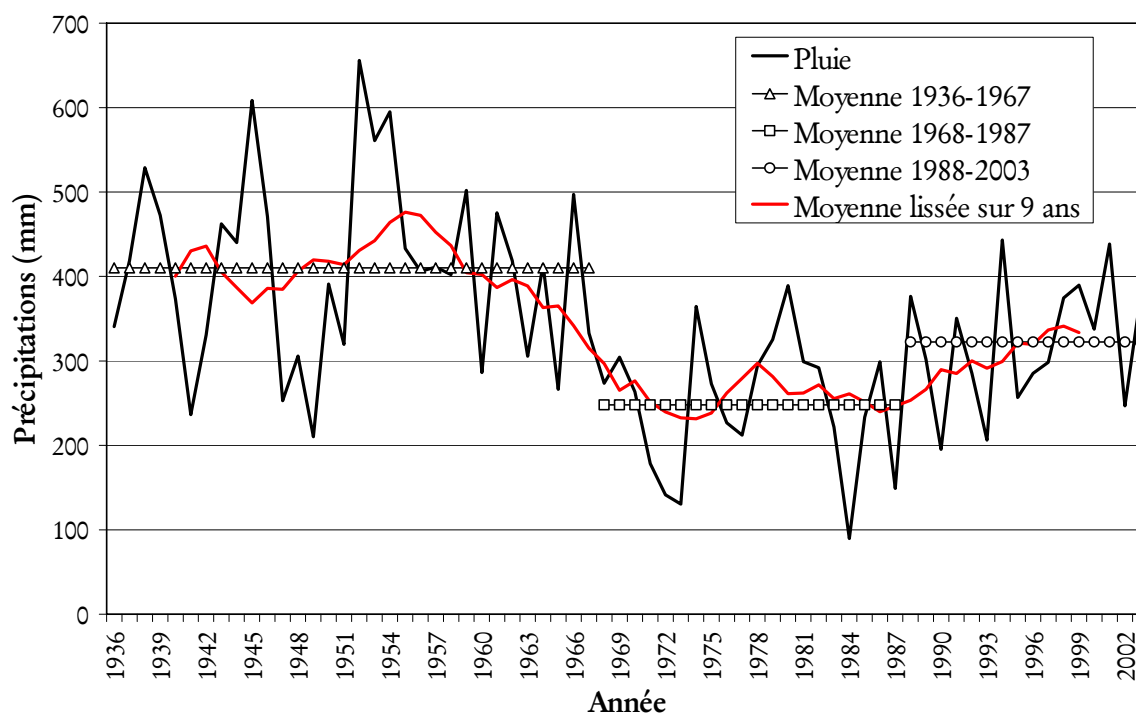


Figure 3 : Précipitations annuelles et moyenne des sous-séries pluviométriques au cours des trois périodes « humide », de « sécheresse » et « actuelle ».

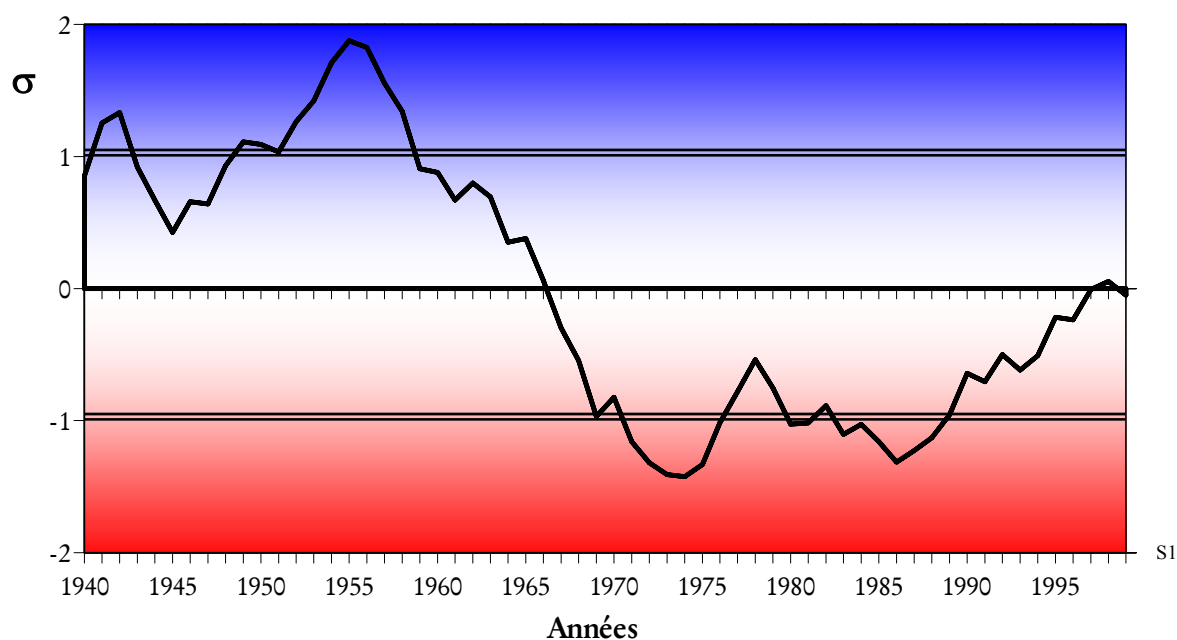


Figure 4 : Courbe lissée sur neuf ans en rapport avec son écart type à la station de Gouré (moyenne = 337 mm, écart type = 74 mm) de 1940 à 1999.

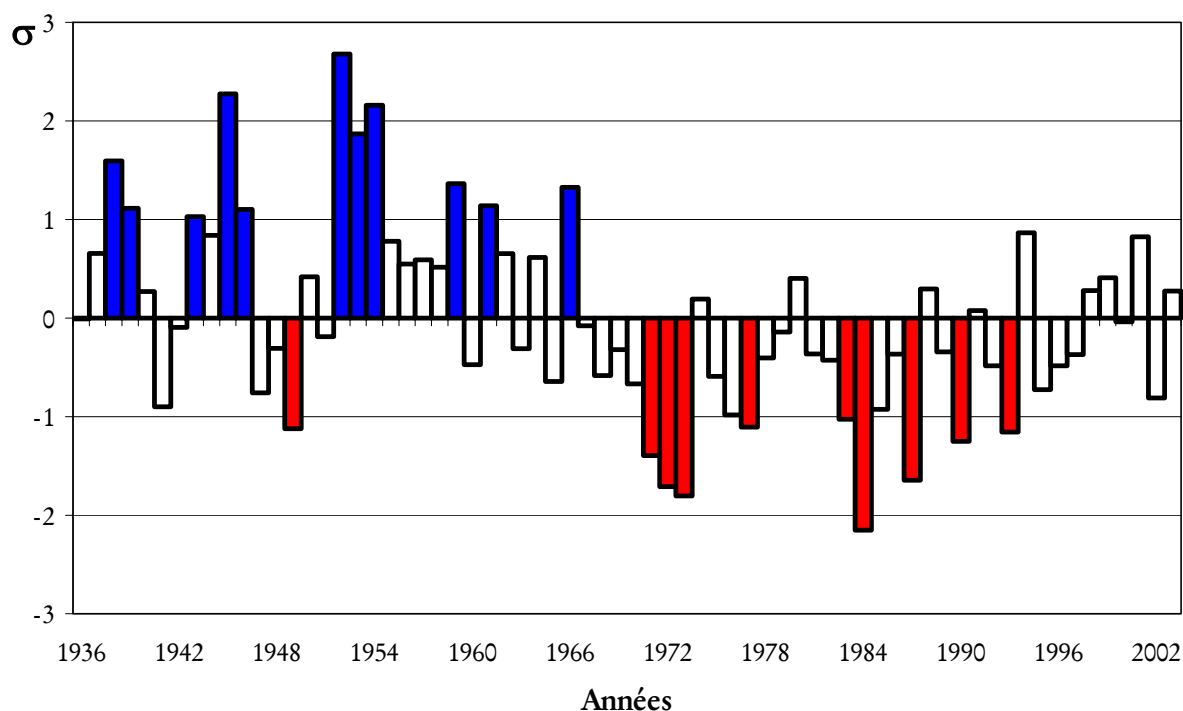


Figure 5 : Evolution des précipitations à Gouré de 1936 à 2003 exprimée en fonction de l'indice d'anomalie pluviométrique selon la méthode de Lamb (1982).

2.2 Distribution mensuelle des précipitations

Du fait de leurs implications biologiques, écologiques et économiques, les précipitations sont l'élément fondamental du climat sahélien. Le régime pluviométrique est simple : à la saison des pluies en été, s'oppose une très longue saison sèche.

Les précipitations, dans la zone sahélienne, se répartissent en moyenne sur une période de sept à cinq mois, diminuant vers le nord et vers l'est. Les mois recevant plus de 10% des précipitations annuelles et que nous considérons comme significatifs de la saison des pluies varient de quatre à deux.

Les caractéristiques particulières à la station de Gouré sont présentées à la figure 6. La distribution mensuelle des précipitations y est représentée pour les trois périodes individualisées au préalable, à savoir les périodes « humide » (1936-1967), de « sécheresse » (1968-1987), et « actuelle ». La saison des pluies se limite donc aux mois de juin-juillet à septembre. En corollaire, la saison sèche s'étend sur une période de huit à neuf mois depuis octobre jusqu'en mai-juin.

Il apparaît que l'essentiel des précipitations (87%) est concentré sur les mois de juillet (31%), août (41%) et septembre (15%), et ce quelle que soit la période analysée. La répartition des précipitations reste relativement stable. Par ailleurs, si les quantités précipitées sont considérées, tous les mois ont été affectés par le déficit pluviométrique. La figure 6 souligne que le mois le plus déficitaire durant la période de « sécheresse » est août, avec un déficit de 47%, il ne recevait plus que 94 mm durant la période 1968-1987 contre 178 mm au cours des décennies précédentes. A lui seul, le mois d'août représente ainsi 52% du déficit annuel enregistré à Gouré durant la « Grande Sécheresse ».

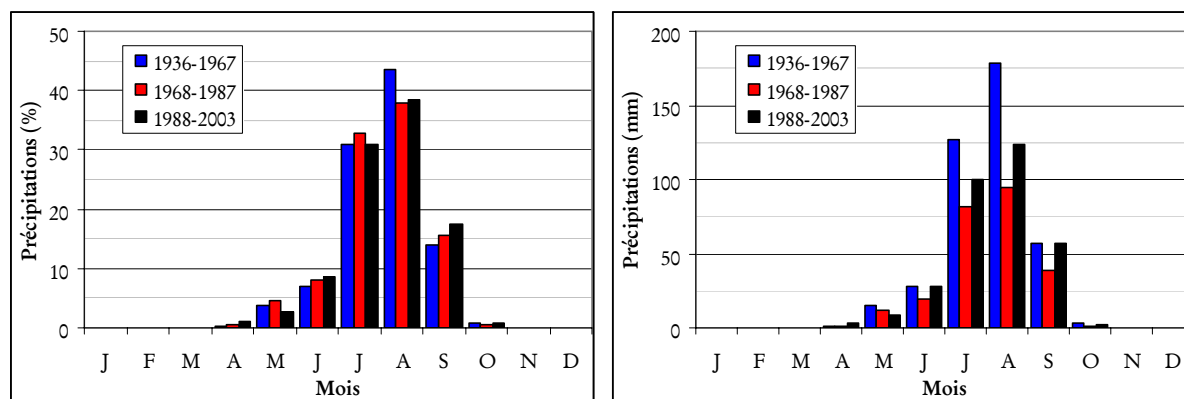


Figure 6 : Répartition mensuelle des précipitations, en pourcentage et en valeur absolue, à la station de Gouré pour les périodes humides (1936-1967), de sécheresse (1968-1987) et actuelle (1988-2003).

2.3 Analyse du nombre de jours de pluie

L'analyse du nombre de jours de pluie n'a été que peu analysée au Sahel. L'intérêt de ce type d'étude réside dans le fait que les événements extrêmes devraient devenir plus fréquents suite au réchauffement climatique (Houghton *et al.*, 2001). Plusieurs pluies violentes ont causé d'importants dégâts en divers points du Sahel au cours des dernières années (Sene & Ozer, 2002 ; Ozer *et al.*, 2003). Ce point mérite donc toute notre attention, notamment pour ce qui est de l'érosion hydrique.

Différentes classes de nombre de jours de pluie ont été définies : nombre total (RR), nombre de jours de pluie supérieure ou égale à 5 mm (RR5), 10 mm (RR10), 15 mm (RR15), 20 mm (RR20) et 30 mm (RR30). L'évolution du nombre de jours de pluie est présentée à la figure 7.

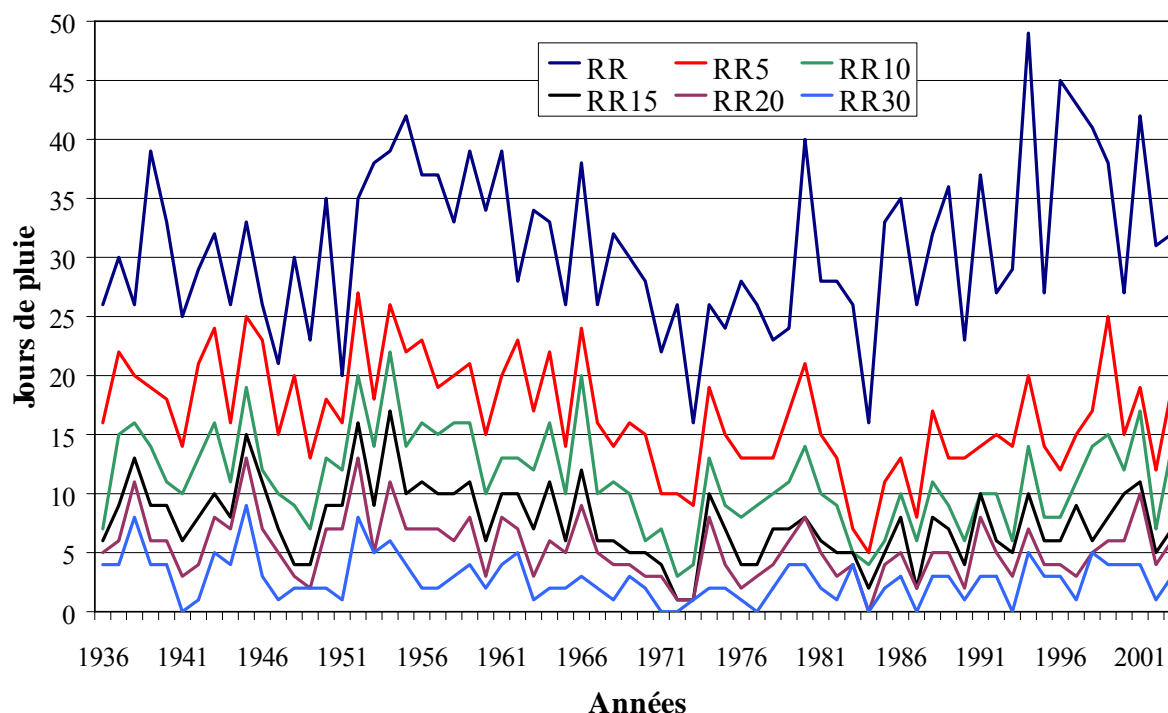


Figure 7 : Evolution du nombre de jours de pluie à la station de Gouré. Nombre total (RR), nombre de jours de pluie ≥ 5 mm (RR5), 10 mm (RR10), 15 mm (RR15), 20 mm (RR20) et 30 mm (RR30).

L'application du test de Pettitt (1979) à la série du nombre total de jours de pluie indique la parfaite stationnarité de cette classe. Par contre, les autres classes présentent un point de rupture à la baisse localisé en 1966 (RR5 à RR20) ou en 1962 (RR30). Une rupture ultérieure à la hausse est ensuite observée dans toutes les classes, sauf RR5, entre 1987 et 1993.

L'absence d'évolution du nombre total de jours de pluie peut sembler surprenante. Il est à noter que si toutes les classes $RR \geq 5$ présentent une rupture significative à la baisse durant les années 1960, le nombre de jours de pluie comprise entre 0,1 et 4,9 mm ($RR < 5$) montre une rupture très significative à la hausse en 1980 (12 jours de $RR < 5$ de 1936 à 1979, contre 19 jours de 1980 à 2003). L'augmentation de cette classe compense alors la baisse du nombre de jours de pluie ≥ 5 mm. La question est dès lors de savoir si cette hausse de la classe $RR < 5$ est due à des modifications climatiques. Notre avis sur la question est clair, il semblerait que l'augmentation des jours de pluie < 5 mm soit due au changement de type d'observations. En effet, l'année 1980 correspond approximativement à la date de création de la station synoptique de Gouré (1983) et il est vraisemblable que les faibles valeurs de précipitations aient été négligées avant cette date et que le passage à la station synoptique, avec son personnel permanent, ait entraîné des observations continues, précises et rigoureuses, ce qui a fort probablement provoqué cette inflation dans les données de pluies journalières inférieures à 5 mm.

Par ailleurs, la proportion de la quantité de pluie durant les événements pluvieux > 20 mm et > 30 mm par rapport à la pluviométrie annuelle est restée stationnaire à Gouré.

2.4 Détermination du début et de fin de la saison des pluies, et de la longueur de la saison culturale

La date du début des pluies est importante dans la planification des opérations agricoles, particulièrement le semis. Il existe plusieurs définitions relatives à la longueur de la saison des

pluies. Dans le cadre de cette étude, nous appliquons les méthodes de Sivakumar (1987) et d'Erpicum *et al.* (1988).

La première a été élaborée à partir d'observations effectuées sur le mil au Centre Sahélien de l'ICRISAT pour une série de stations sahéliennes et soudanaises. Elle a ensuite été appliquée à tout le réseau de stations pluviométriques au Sénégal, Niger, Mali, Burkina Faso. Pour cette méthode, le critère retenu pour déterminer la date du début de la saison des pluies est de 20 mm de pluie recueillis en trois jours consécutifs après le 1^{er} mai, sans période sèche supérieure à sept jours dans les trente jours qui suivent. La fin de la saison des pluies est fixée au jour où, après le premier septembre, il n'y a plus de pluie durant une période de vingt jours. La seconde a été développée au Sénégal avant d'être appliquée au Niger (Ozer, 1993 ; Ozer & Erpicum, 1995). Erpicum *et al.* (1988) ont montré que, selon des critères climatiques, la saison des pluies commence au moment où la probabilité d'avoir un jour de pluie au cours d'une « pentade » (période de cinq jours) déterminée est supérieure à celle d'avoir un jour sec appartenant à un épisode de sept jours. Selon le même calcul, la fin de la saison des pluies est fixée dès que la probabilité d'avoir un jour sec appartenant à un épisode de sept jours est supérieure à celle d'avoir un jour de pluie au cours d'une « pentade ».

Pour les deux méthodes, la longueur de la saison des pluies est la différence en jours entre les dates de fin et de début des pluies. En outre, dans ces deux méthodes, les pluies inférieures à 1 mm ne sont pas considérées car elles sont non significatives. Donc, nous avons écarté les données pluviométriques quotidiennes comprises entre 0,1 et 0,9 mm.

Les résultats relatifs à la date de début de la saison des pluies obtenus selon la méthode de Sivakumar (1987) sont présentés à la figure 8. La date moyenne de début des pluies à Gouré est le 10 juillet \pm 17 jours (écart type), la saison des pluies commence donc approximativement entre le 23 juin et le 27 juillet. Durant les périodes humide, de sécheresse, et actuelle, les dates moyennes de début des pluies sont respectivement les 9, 12 et 10 juillet.

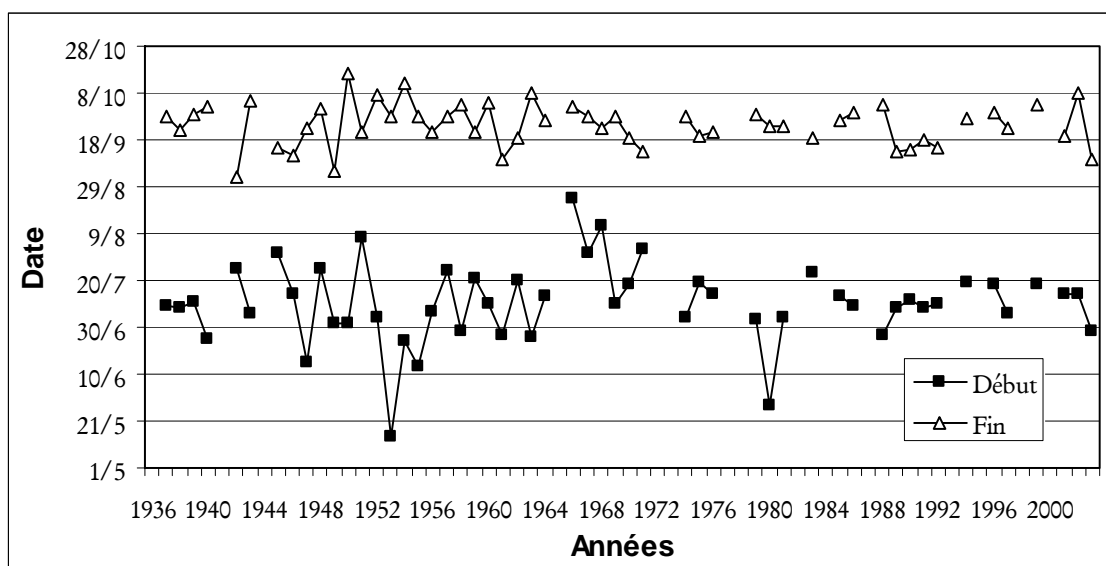


Figure 8 : Date de début et de fin de la saison des pluies à Gouré, de 1936 à 2003 selon la méthode de Sivakumar (1987)

Cependant, il semble nécessaire de noter que pour 14 années, soit dans 21% des cas, le début de la saison des pluies n'a jamais été observé selon cette méthode. En réalité, la période humide a connu 29 débuts de saison des pluies sur 32 (soit 91%). Par la suite, 35% des années comprises dans la période de sécheresse (7 sur 20) n'ont jamais connu de départ de la saison des pluies, contre seulement 25% (4 sur 16) durant la période actuelle. En ce qui concerne la fin de la saison des pluies, celle-ci se produit les 25, 23 et 22 septembre, respectivement pour

les périodes humides, de sécheresse, et actuelle. Globalement, toujours selon la méthode de Sivakumar (1987), la longueur de la saison des pluies semble avoir peu changé : 79 jours pendant la période humide, et 73 et 75 jours durant les deux périodes successives. Pour ce qui est de la méthode d'Erpicum *et al.* (1988) appliquée aux données de Gouré, il apparaît que la saison des pluies s'étendait du 11 juillet au 31 août durant la période humide, pour se restreindre ensuite de deux pentades, du 16 juillet au 25 août pendant les périodes de sécheresse et actuelle (Fig. 9).

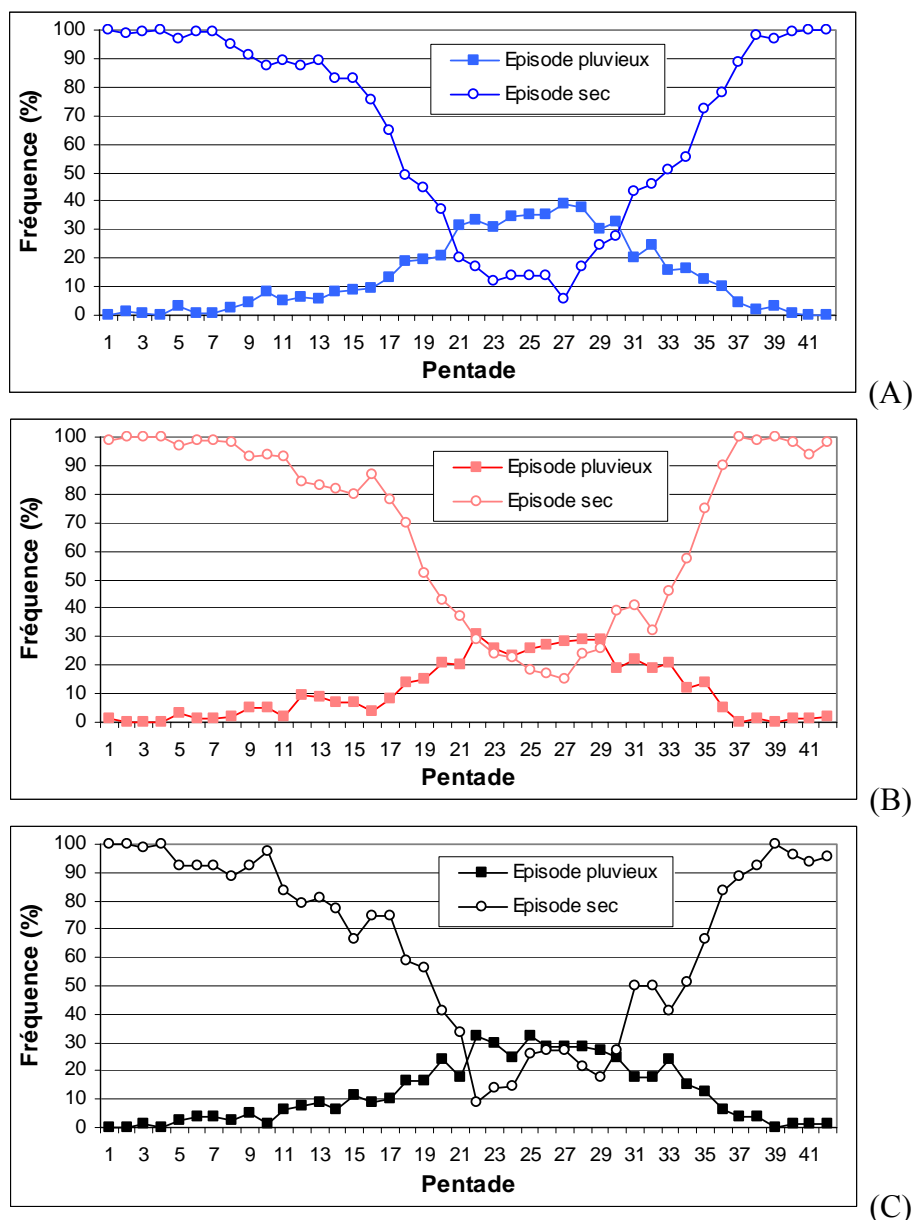


Figure 9 : Estimation par pentade de la durée de la saison des pluies à Gouré, du 1^{er} avril au 31 octobre pendant les périodes (A) humides, (B) de sécheresse, et (C) actuelle selon la méthode d'Erpicum *et al.* (1988).

Quelle que soit la méthode utilisée, la longueur totale de la saison des pluies semble s'être contractée entre la période humide et la période de sécheresse, puis stabilisée par la suite. En effet, de 52 jours, la saison de pluies s'est contractée à 41 jours, soit de 20%, selon la méthode d'Erpicum *et al.* (1988). Cependant, si la saison ne s'est pas allongée durant les 16 dernières années, son amplitude (c'est-à-dire l'aire comprise entre la probabilité d'une pentade sèche et d'une pentade humide) a néanmoins doublé, ce qui montre que la saison des pluies s'est

intensifiée. En ce qui concerne la méthode de Sivakumar (1987), la longueur de la saison des pluies montre une moindre diminution, de l'ordre de 10%. Cependant, l'absence de saison des pluies semble être le meilleur indicateur qui, elle, représente 9%, 35% et 25% respectivement pour les périodes humides, de sécheresse, et actuelle.

3 Analyse du vent

Les données de vitesse et direction du vent à 10 mètres ont été sélectionnées sur une base tri-horaire, à 00h00, 03h00, 06h00, 09h00, 12h00, 15h00, 18h00, et 21h00 UTC, dans les observations synoptiques archivées à la Direction de la Météorologie Nationale du Niger. Les données sont complètes de janvier 1984 à décembre 1996. Après cette date, les données relatives au vent ne sont plus disponibles à cause d'un appareillage défectueux qui jamais n'a été remplacé depuis. Nous profitons de ces lignes pour attirer l'attention du lecteur sur le fait que toutes les stations les plus proches (Zinder, Maine Soroa, Diffa et Nguigmi) connaissent la même situation calamiteuse depuis plusieurs années. Il n'y a donc plus de données de vent disponibles pour le Niger oriental.

L'analyse de la vitesse du vent a été effectuée en utilisant toutes les données tri-horaires encodées manuellement pour la période disponible de 13 années (1984-1996). La fréquence des différentes vitesses de vent a été calculée. Cependant, seules trois classes ont été retenues dans cette analyse : les vents ≥ 5 m/s, ≥ 7 m/s, et ≥ 9 m/s. Les résultats au pas de temps annuel sont présentés à la figure 10.

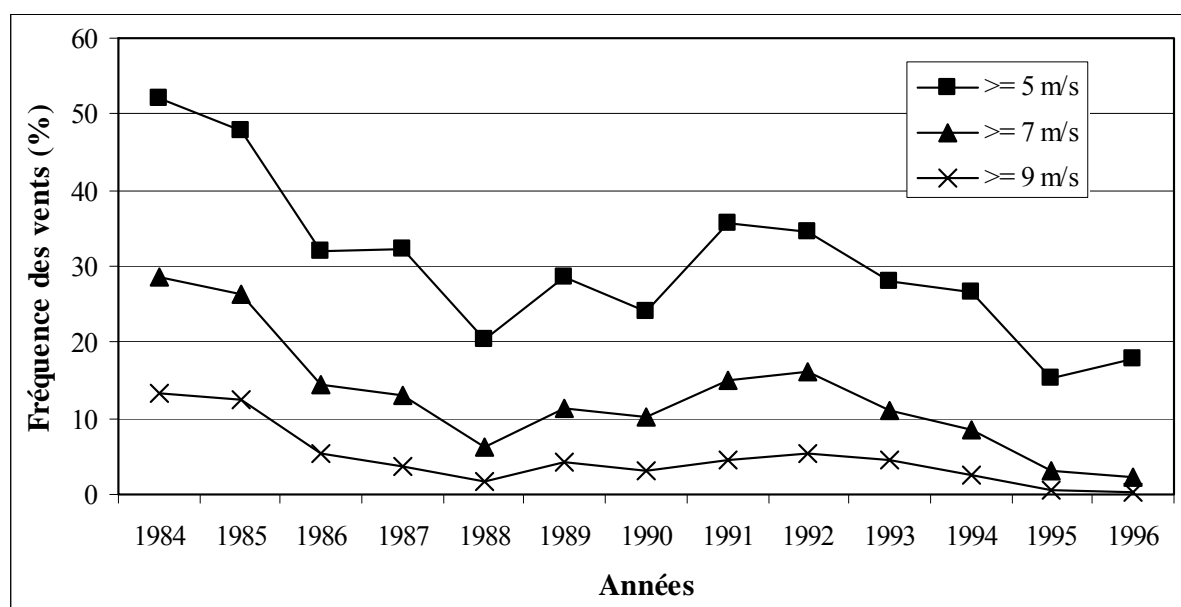


Figure 10 : Fréquence des vents ≥ 5 m/s, ≥ 7 m/s, et ≥ 9 m/s à la station de Gouré de 1984 à 1996.

Il apparaît que les vents forment deux groupes différents, à savoir d'une part en 1984 et 1985, et d'autre part de 1986 à 1996. En effet, durant les années 1984 et 1985, la fréquence moyenne des vents dont la vitesse est ≥ 5 m/s, ≥ 7 m/s, et ≥ 9 m/s était de 50%, 28% et 13%, respectivement. Ces fréquences chutent ensuite très lourdement pour ne plus représenter que 27% (max : 36%, min : 15%), 10% (max : 16%, min : 2%) et 3% (max : 6%, min : 0%), respectivement pour les vents ≥ 5 m/s, ≥ 7 m/s, et ≥ 9 m/s, durant les onze années suivantes. La fréquence moyenne des vents enregistrés durant les années 1984 et 1985 est en accord avec les valeurs obtenues dans d'autres stations sahéliennes au Niger. En effet, Ozer

(2000) montre que la fréquence moyenne des vents ≥ 6 m/s est de l'ordre de 40% et varie entre 36% (Zinder) et 48% (Niamey) de 1951 à 1997. La baisse de la fréquence des vents 'forts' observée à Gouré pour la période 1986-1996 n'est qu'un artéfact et est vraisemblablement due à l'encrassage et à l'absence d'entretien de l'anémomètre au fil du temps.

Quant à la direction (Fig. 11), la principale composante est E – NE (49%) qui souligne la longue présence de l'Harmattan. A l'opposé, les vents représentatifs de la saison des pluies (O – SO) ne représentent que 21% des vents. Par contre, les vents forts (≥ 9 m/s) pouvant déclencher des processus d'érosion soufflent essentiellement du secteur E – NE (60%) et secondairement (25%) de la direction opposée (O – SO).

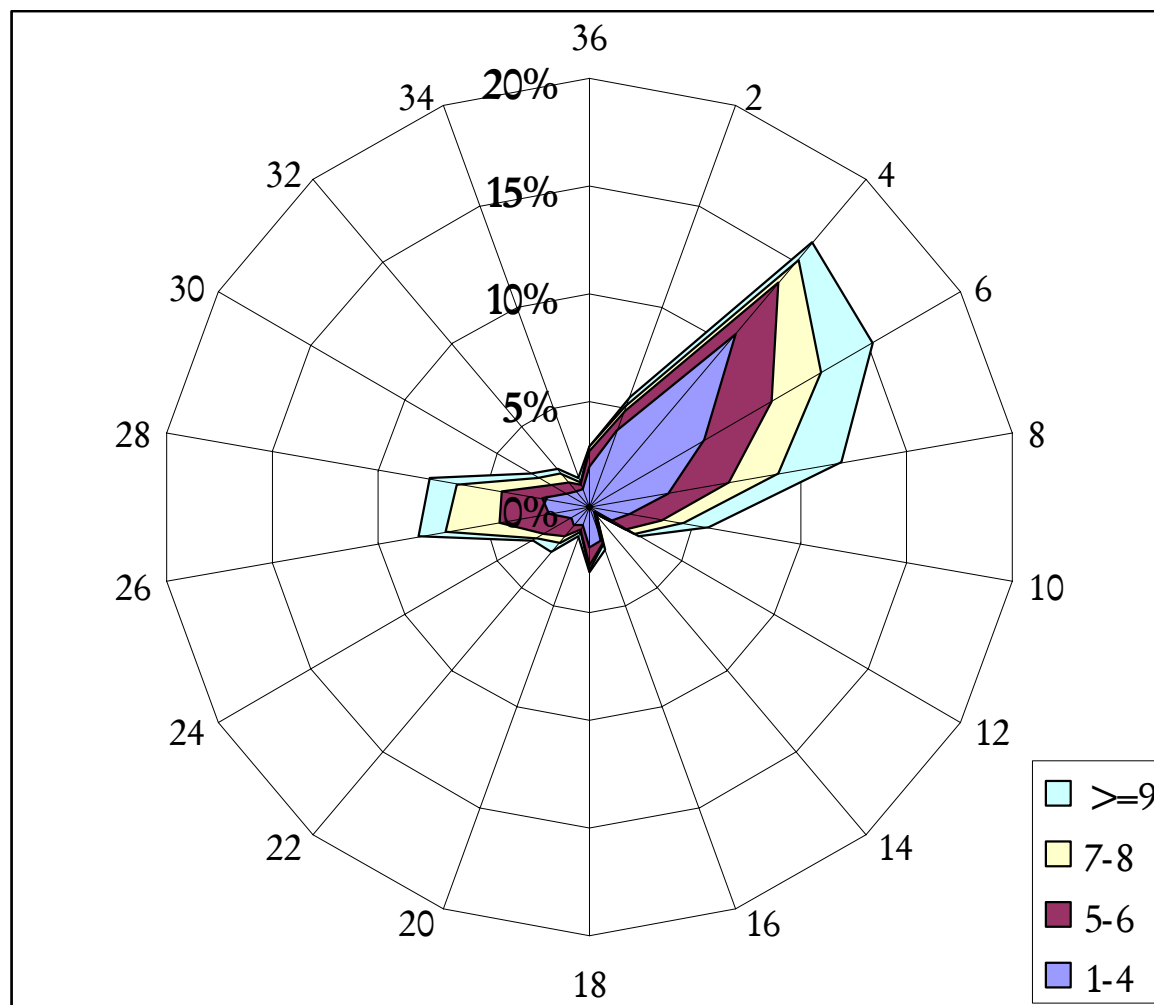


Figure 11 : Fréquence de la direction des vents en fonction de différentes classes de vitesses à la station de Gouré en 1984.

4 Estimation de la vitesse du vent efficace

Le vent est l'unique paramètre climatique capable d'injecter des particules terrigènes dans l'atmosphère. Aussi, dans le but d'estimer la vitesse du vent efficace à Gouré, nous étudions la relation entre la vitesse du vent et les cas de déflation durant l'année 1984, année durant laquelle les vitesses de vent sont fiables.

Les cas de déflation, c'est-à-dire les chasse-sable et tempêtes de sable, nous sont renseignés par les données de visibilité horizontale qui ont été sélectionnées sur une base tri-horaire, à 03h00, 06h00, 09h00, 12h00, 15h00, 18h00, 21h00 et 24h00 UTC, dans les observations

synoptiques archivées à la Direction de la Météorologie Nationale du Niger. Dans le cadre de cette étude, nous n'avons retenu que les cas de déflation réduisant la visibilité horizontale à moins de 5 kilomètres.

Pour ce faire, nous avons associé la vitesse du vent aux cas de déflation. Le résultat obtenu est présenté à la figure 12. Il apparaît le vent devient capable d'initialiser l'érosion dès 6 m/s et dépasse le seuil de 5% de déflation pour une vitesse de 7 m/s. Ce potentiel augmente logiquement avec la vitesse et atteint la valeur de 20% de déflation associée à une vitesse de 9 m/s. Ces résultats sont en parfait accord avec les résultats de Ozer (2000) obtenus à la station 'voisine' de Zinder pour la période 1987 à 1997.

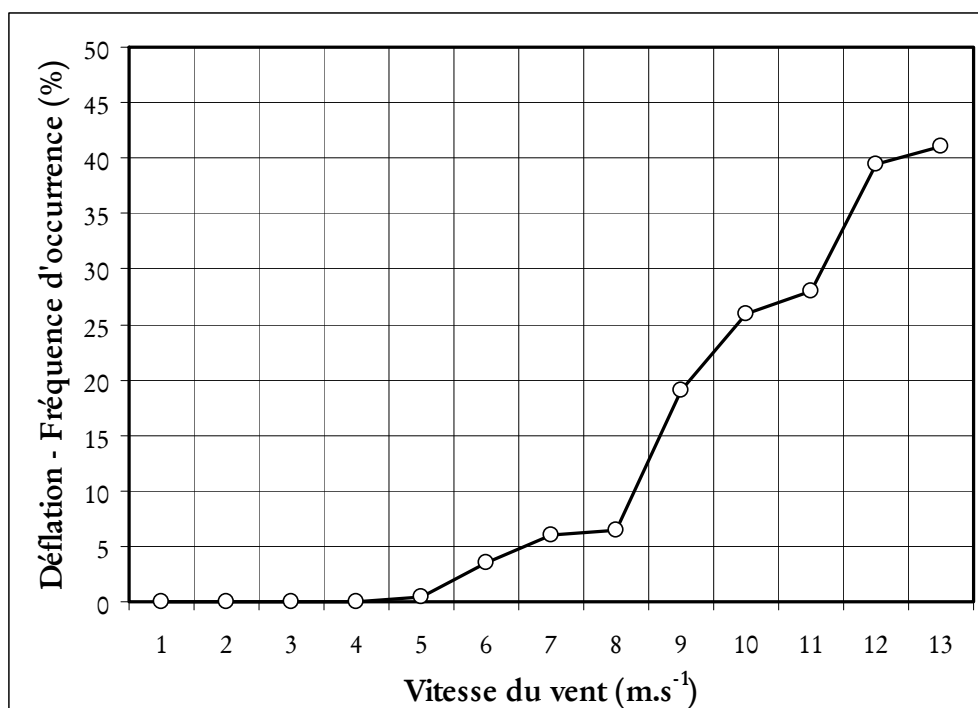


Figure 12 : Fréquence d'observation des jours avec déflation en fonction de la vitesse du vent (m s⁻¹) à la station de Gouré en 1984.

Cependant, ces valeurs doivent être considérées comme une moyenne indicative. Il est fort probable que la vitesse du vent efficace varie durant les saisons en fonction du pourcentage de couvert végétal au sol (Fryrear 1995 ; Lancaster & Baas 1998), mais également au cours de la journée. En effet, les vents sont plutôt laminaires durant la nuit et beaucoup plus turbulents et tourbillonnaires durant les heures chaudes du jour. Or, à vitesse égale, un vent turbulent est plus efficace qu'un vent laminaire. Il est évident également que l'année 1984, très sèche (~ 90 mm) n'est peut-être pas représentative pour l'estimation de la vitesse du vent efficace.

5 Estimation de la quantité de poussières dans l'air

Au cours des dix dernières années, l'analyse des poussières minérales s'est imposée comme l'un des sujets majeurs traités dans les études environnementales. L'augmentation de l'érosion éolienne observée ces dernières décennies dans la plupart des régions arides et semi-arides de la planète apparaît liée aux pressions environnementales sans cesse croissantes et au changement climatique global se traduisant dans ces régions par des déficits pluviométriques prononcés (Nicholson 2001 ; Ozer 2002 ; Tegen & Fung 1995). En outre, il est maintenant irréfutable que la pollution de l'air causée par l'augmentation de la production de poussières minérales a maintes conséquences adverses sur l'environnement et l'Homme.

Pour ce qui est de la santé humaine, la détérioration de la qualité de l'air causée par la forte concentration en poussières minérales africaines a été rapportée en différentes régions assez éloignées du Sahara et de sa périphérie directe. A titre d'exemple, nous citerons les récents travaux réalisés dans les îles Canaries, en Espagne, en Grande-Bretagne, au Moyen-Orient ou encore dans le sud-est des Etats-Unis (Alpert & Ganor 2001 ; Prospero 1999 ; Rodriguez *et al.* 2001, 2003 ; Ryall *et al.* 2002 ; Viana *et al.* 2002).

Cette pollution de l'air par une importante concentration en particules solides promeut les infections respiratoires, les maladies cardio-vasculaires et une multitude d'autres troubles de la santé (Biielders *et al.*, 2001 ; Griffin *et al.* 2001 ; WHO 2000 ; Wiggs *et al.* 2003). On distingue les particules en suspension totales (PST) des PM₁₀ qui représentent les particules respirables, à savoir la partie des PST dont la taille est inférieure à 10 µm. A titre d'exemple, une augmentation de 7,66% des maladies respiratoires (+1.12% à chaque accroissement de 10 µg m⁻³ en PM₁₀) et de 4,92% de la mortalité totale (+0.72% à chaque accroissement de 10 µg m⁻³ en PM₁₀) durant le passage de poussières désertiques originaires de Mongolie a été mise en évidence à Taipei, Taiwan (Chen *et al.* 2004). De plus, les poussières minérales ainsi emportées par le vent peuvent transporter des bactéries et des spores, sont parfois contaminées par des pesticides, voire même radioactives (Griffin *et al.* 2001 ; O'Hara *et al.* 2000 ; Papastefanou *et al.* 2001).

Etonnamment, et malgré tous les effets indésirables de ces poussières sur la santé humaine, nul n'a idée des niveaux de concentration en particules en suspension totales (PST) dans les régions limitrophes du Sahara. En effet, ces informations ne sont disponibles en Afrique que pour Accra au Ghana, Nairobi au Kenya, et Le Cap en Afrique du Sud (WHO 2000 ; Baldasano *et al.* 2003). En ce qui concerne la concentration en particules respirables (PM₁₀), aucune information n'est disponible en Afrique (Baldasano *et al.* 2003).

Sur base des mesures de visibilité horizontale réduite par les poussières minérales dans l'air, nous estimons ici les niveaux de concentration en PST et en PM₁₀ au niveau de la station synoptique de Gouré en utilisant différentes relations disponibles dans la littérature. L'étude se concentre sur l'analyse de l'année 1984, unique année pour laquelle nous avons eu accès aux données de visibilité. La région de Gouré se situe directement sous le vent de la dépression du Bodélé (Fig. 13) qui s'avère être la première source de poussières minérales au monde (Prospero *et al.* 2002 ; Washington *et al.* 2003).

Une fois injectées dans l'atmosphère, ces poussières sont transportées vers le sud du Niger et le Nigeria avant d'atteindre le Golfe de Guinée. Ce transport se fait à basse altitude durant la période de l'Harmattan en saison sèche (novembre à avril) et, souvent, à des altitudes plus élevées le reste de l'année suite à la remontée du front inter-tropical vers le nord (Afeti & Resch 2000 ; Kalu 1979 ; Middleton & Goudie 2001).

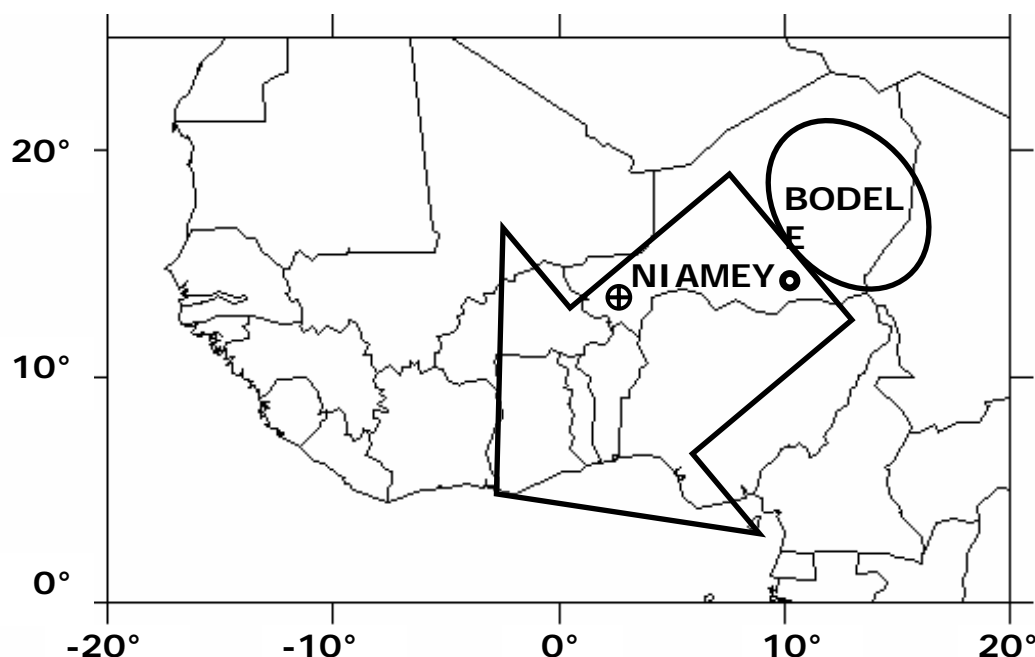


Figure 13: Localisation de la dépression fermée du Bodélé, de Gouré et de Niamey. La flèche indique la direction habituelle du transport des poussières minérales.

5.1 Données et méthodes

En météorologie, la visibilité est l'un des paramètres utilisés pour identifier les caractéristiques des masses d'air. Dans les stations synoptiques, la visibilité horizontale est observée au pas de temps horaire et est définie par l'Organisation Météorologique Mondiale (WMO 1992) comme étant la *"distance maximale à laquelle un observateur peut voir et identifier un objet situé à proximité du plan horizontal où il se trouve lui-même"*. La station synoptique de Gouré comporte un dizaine de points de repère qui sont répartis dans toutes les directions. Huit de ces points de repères sont situés dans les cinq premiers kilomètres autour de la station, ce qui limite la marge d'erreur potentielle de l'estimation de la visibilité horizontale. Certes, une erreur minime persiste lors de l'estimation de la visibilité horizontale proprement dite. Ainsi, lorsque l'observateur est en mesure d'identifier une cible située à trois kilomètres alors que le point de repère situé à quatre kilomètres est masqué par la présence de poussière, la visibilité horizontale reportée sera de trois kilomètres. Dans cet exemple, la valeur reportée comporte une légère marge d'erreur inférieure au kilomètre. Cependant, la distribution des points de repères étant inversement proportionnelle à la distance du point d'observation, la marge d'erreur devrait être négligeable. La qualité de ces données a été largement discutée dans des études préalables (Middleton 1985 ; Ozer 2000). Cette étude ne considère que les visibilités réduites par des lithométéores, à savoir des *"météores consistant en un ensemble de particules dont la plupart sont solides et non aqueuses. Ces particules sont plus ou moins en suspension dans l'atmosphère, ou soulevées du sol par le vent"* (WMO 1992).

Les données de visibilité horizontale ont été sélectionnées sur une base tri-horaire, à 03h00, 06h00, 09h00, 12h00, 15h00, 18h00, 21h00, et 24h00 UTC, dans les observations synoptiques archivées à la Direction de la Météorologie Nationale du Niger. Seules les visibilités horizontales inférieures à cinq kilomètres sont considérées dans cette étude. Les plus grandes valeurs ne sont pas utilisées car au-delà de cinq kilomètres de visibilité horizontale, les cibles se trouvent respectivement à six, dix et quinze kilomètres, ce qui accentue l'erreur relative à l'estimation de la visibilité.

Quelques études sur la relation entre visibilité horizontale et concentration en PST ont été menées en Afrique de l'Ouest (Tab. 1). Ben Mohamed et son équipe (1992) ont utilisé les

données de sept stations synoptiques au Niger durant 17 mois (Eq. 1). Ces auteurs considèrent tout le spectre des visibilités horizontales, à savoir de 100 mètres à 20 kilomètres. D'Almeida (1986) est, à notre connaissance, le seul chercheur à avoir établi une relation liant visibilité à concentration de poussières en PM_{10} (Eq. 2). Son étude se base sur les données recueillies en 1981 et 1982 dans onze stations synoptiques essentiellement réparties au sud du Sahara. Le coefficient de détermination (r^2) entre la concentration de poussières en PM_{10} et la visibilité horizontale est de 0,95. La relation de D'Almeida (1986) est basée sur plus de 200 observations de visibilité horizontale variant de 200 mètres à 40 kilomètres.

Relation	Eq.	Localisation	Auteurs
$C = 1339.84 \text{ VV}^{-0.67}$	(1) ^a	7 stations (Niger)	Ben Mohamed <i>et al.</i> , 1992
$C = 914,06 \text{ VV}^{-0.73} + 19,03$	(2) ^b	Agadez (Niger), ...	D'Almeida, 1986

Tableau 1
Relation entre la visibilité horizontale (VV en km) et la concentration en PST^a ou PM_{10} ^b (C en $\mu\text{g m}^{-3}$)

Rares sont les études ponctuelles permettant de faire une comparaison entre les mesures de visibilité horizontale et les concentrations en PST. Au Mali, Gillies et ses collègues (1996) ont observé une concentration journalière en PST de $13\,735 \mu\text{g m}^{-3}$ durant une brume sèche très dense ayant réduit la visibilité horizontale à moins de 100 mètres durant 24 heures. En Corée, Chung et son équipe (2003) ont analysé les invasions de lithométéores originaires de Chine et ont trouvé des concentrations moyennes en PST de 659 et $380 \mu\text{g m}^{-3}$ associées avec des visibilités horizontales de respectivement 3 et 5 kilomètres. Ces rares informations sont du même ordre de grandeur que les valeurs obtenues par la relation de Ben Mohamed *et al.* (1992) présentée préalablement et utilisée par la suite.

Les deux relations (Eq. 1 et 2, Tab. 1) sont appliquées aux données de visibilité horizontale de la station de Gouré dans le but d'obtenir une estimation de la concentration en PST et en PM_{10} . Les résultats ainsi obtenus sont présentés aux pas de temps quotidien, mensuel et annuel. Ces informations sont ensuite comparées à quelques normes de qualité de l'air.

5.2 Résultats et discussion

A. Concentration journalière en PST et PM_{10}

Durant ces deux dernières décennies, la concentration en PST était, pour ce qui est de la pollution par les particules, le critère retenu pour le suivi de la qualité de l'air. Le seuil retenu par les différentes directives nationales sur la qualité de l'air était habituellement une concentration journalière en PST de $300 \mu\text{g m}^{-3}$ ne pouvant être dépassée qu'un certain nombre de jours par an ; par exemple, 18 fois en Espagne (Artiñano *et al.*, 2001). Les concentrations journalières en PST à la station de Gouré ont été obtenues en calculant la moyenne des huit données tri-horaires disponibles quotidiennement.

La figure 14 présente la distribution de la fréquence des concentrations journalières en PST durant l'année 1984. Il apparaît que 60% des jours analysés présentent une qualité de l'air excellente ($PST < 50 \mu\text{g m}^{-3} \text{ j}^{-1}$). Cependant, des niveaux de concentration en PST préoccupants ($> 300 \mu\text{g m}^{-3} \text{ j}^{-1}$) s'observent dans 25% des cas, soit 92 jours par an. Ce nombre de dépassements du seuil critique est extrêmement important, cinq fois le maximum toléré en Espagne.

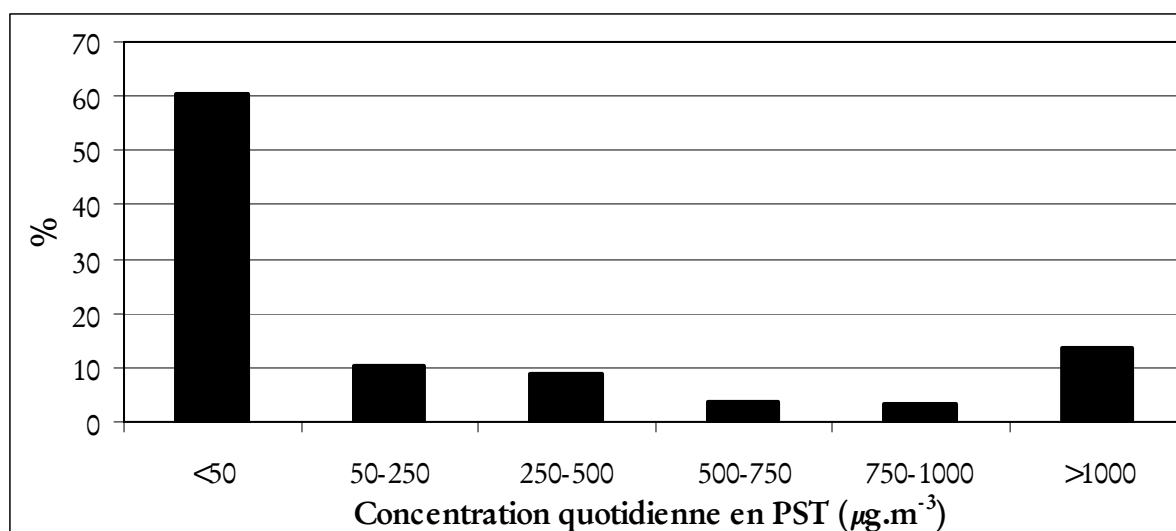


Figure 14: Distribution de la fréquence des concentrations journalières en PST à la station de Gouré durant 1984.

Au fil des années, les pays développés ont fixé des normes de qualité de l'air relatives aux concentrations journalières en PM_{10} . Le seuil retenu par les différentes réglementations nationales sur la qualité de l'air varie de 50 à $150 \mu\text{g m}^{-3}$ pour la concentration journalière en PM_{10} (Baldasano et al. 2003). La distribution de la fréquence des concentrations journalières en PM_{10} durant l'année 1984 est présentée à la figure 15. Ci-après, nous présentons une discussion relative à ces niveaux de pollution de l'air par rapport aux législations en vigueur aux Etats-Unis et à venir en Europe.

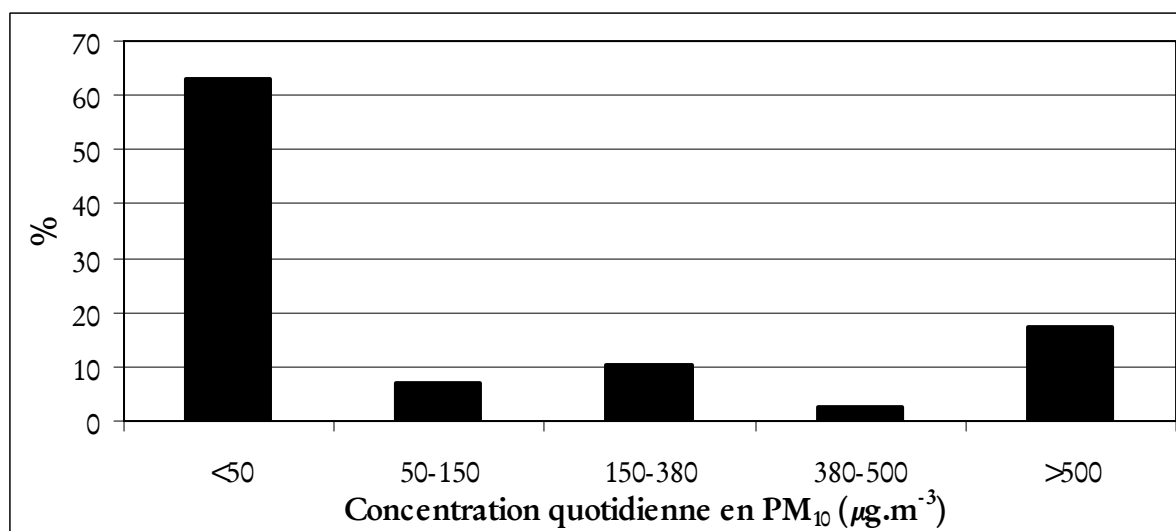


Figure 15: Distribution de la fréquence des concentrations journalières en PM_{10} à la station de Gouré durant 1984.

Aux Etats-Unis, l'*Environmental Protection Agency* a dressé une liste détaillée des effets sur la santé humaine provoqués par différents niveaux de concentration en PM_{10} . Le tableau 2 reprend ceux-ci de manière succincte (Boubel et al. 1994).

Niveau de pollution en PM ₁₀ (concentration en $\mu\text{g.m}^{-3}.\text{j}^{-1}$)	Qualité de l'air	Effets sur la santé
0-50	Excellente	–
50-150	Moyenne	–
150-380	Malsaine	Aggravation légère des symptômes des personnes susceptibles (essentiellement maladies respiratoires) et irritation des voies respiratoires de la population en bonne santé.
380-420	Très malsaine	Aggravation significative des symptômes des personnes susceptibles (maladies respiratoires et cardiaques) et irritation répandue des voies respiratoires de la population en bonne santé.
420-500	Médiocre	Déclenchement de certaines maladies en plus de l'aggravation des symptômes et de la diminution de la tolérance à l'exercice physique chez les personnes en bonne santé.
> 500	Dangereuse	Mort prématurée chez les personnes susceptibles (maladies respiratoires et cardiaques). Les personnes en bonne santé connaissent divers symptômes et maladies qui affectent leur activité normale.

Tableau 2
Niveaux quotidiens de pollution de l'air en PM₁₀ ($\mu\text{g m}^{-3}$) et effets observés sur la santé humaine (d'après Boubel et al. 1994).

La concentration journalière limite en PM₁₀ définie par l'Agence de Protection Environnementale américaine est de $150 \mu\text{g m}^{-3}$. L'application de ce seuil à Gouré montre que 30% des jours analysés (soit 110 jours) dépassent cette limite (Fig. 15). La qualité de l'air serait malsaine, très malsaine à médiocre et dangereuse dans respectivement 10%, 2% et 18% des cas. Ceci revient à dire qu'une qualité de l'air dangereuse (PM₁₀ > $500 \mu\text{g m}^{-3}.\text{j}^{-1}$), associée à la mort prématurée chez certaines catégories de personnes (vulnérables par rapport aux maladies respiratoires et cardiaques), a été observée à 59 reprises en 1984.

En Europe, la Commission Européenne a récemment établi certains seuils très sévères de concentration en PM₁₀ pour le suivi de la qualité de l'air. Cette nouvelle directive sur la qualité de l'air sera rendue effective en deux phases à la fin desquelles une concentration journalière en PM₁₀ de $50 \mu\text{g m}^{-3}$ ne pourra être dépassée que 35 jours par an en janvier 2005 et 7 jours par an en janvier 2010. Il appert que dans 37% des cas, soit 136 jours en 1984, cette limite de $50 \mu\text{g m}^{-3}$ a été dépassée à Gouré (Fig. 15), près de vingt fois la fréquence maximale qui sera tolérée dans l'Union Européenne en 2010.

L'application de ces différentes directives sur la qualité de l'air aux valeurs estimées à Gouré est édifiante. Les concentrations en poussières minérales sont très importantes tant du point de vue de leur magnitude que de leur fréquence. Les fortes concentrations en poussières éoliennes dans l'air posent un réel problème de santé publique dont la gestion est particulièrement malaisée car modifier la fréquence des lithométéores touchant le Sahel est impossible dans les conditions actuelles et parce que les modalités de prévention sont difficilement applicables.

B. Concentration mensuelle en PST et PM₁₀

Les valeurs de concentrations mensuelles en PST et PM₁₀ obtenues à Gouré pour 1984 sont présentées à la figure 16. Il ressort de l'analyse de cette figure que les concentrations

mensuelles en PST varient fortement selon les saisons. Un maximum est atteint au mois de janvier qui, avec une concentration en PST supérieure à $1200 \mu\text{g m}^{-3}$, représente à lui seul près de 30% de la pollution atmosphérique annuelle. Durant les autres mois de la saison de l'Harmattan (octobre à avril), les valeurs mensuelles sont de l'ordre de 300 à $550 \mu\text{g m}^{-3}$. La concentration mensuelle en PST baisse sévèrement à partir de mai jusqu'en septembre ($<100 \mu\text{g m}^{-3}$). Le profil obtenu pour les concentrations mensuelles en PM_{10} est similaire. Les mois de l'Harmattan sont caractérisés par des valeurs mensuelles en PM_{10} qui sont supérieures à $200 \mu\text{g m}^{-3}$. Des concentrations en PM_{10} inférieures (100 à $200 \mu\text{g m}^{-3}$) ont été observées en Irak, au Koweït et en Arabie Saoudite durant la saison la plus active du point de vue des processus éoliens (Draxler *et al.* 2001). Par ailleurs, des valeurs du même ordre de grandeur (112 à $255 \mu\text{g m}^{-3}$) ont été mesurées aux abords de la Mer d'Aral durant la période la plus intense en tempêtes de sable (Wiggs *et al.* 2003).

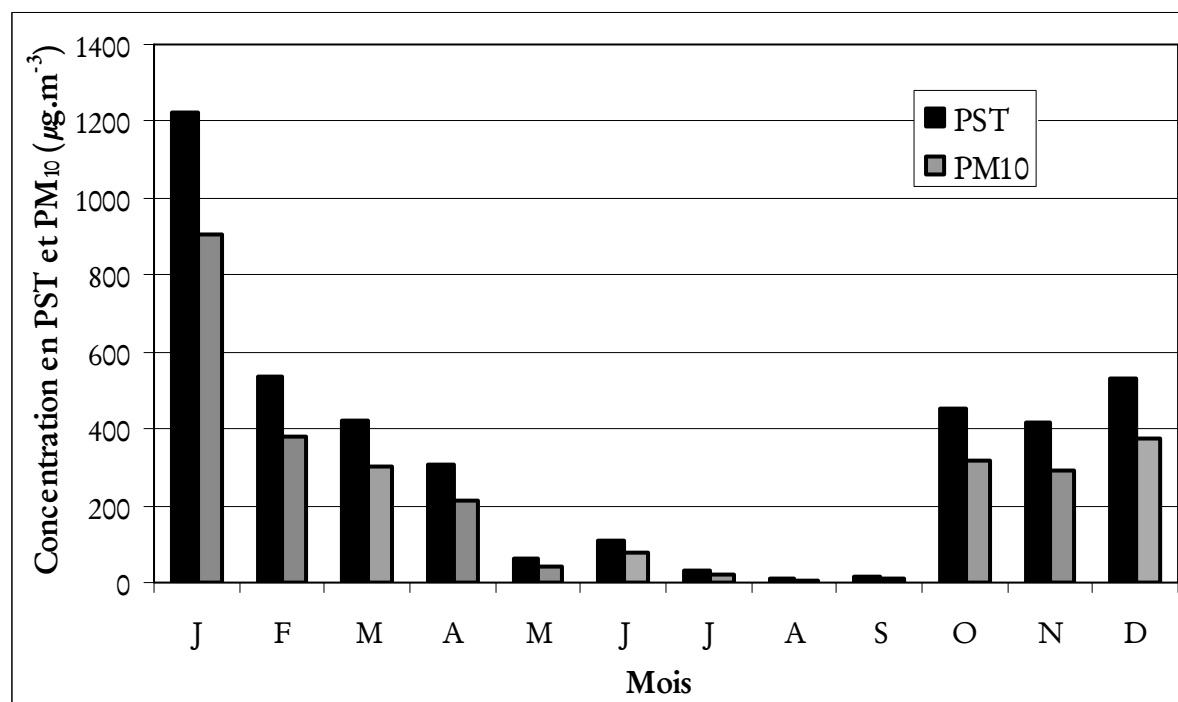


Figure 16: Concentration mensuelle en PST et PM_{10} ($\mu\text{g m}^{-3}$) à la station de Gouré durant 1984.

C. Concentration annuelle en PST et PM_{10}

La concentration annuelle en PST est de $344 \mu\text{g m}^{-3}$ en 1984. Cette valeur est préoccupante puisqu'elle est approximativement quatre fois plus élevée que la concentration annuelle limite de 60 - $90 \mu\text{g m}^{-3}$ prescrite par l'Organisation Mondiale de la Santé dans ses directives sur la qualité de l'air (WHO 1979). Cette valeur est largement supérieure à la concentration annuelle en PST de $137 \mu\text{g m}^{-3}$ mesurée à Accra, Ghana, la seule information disponible en Afrique de l'Ouest qui puisse nous permettre de faire une comparaison (Baldasano *et al.* 2003).

La concentration annuelle en PM_{10} est de $245 \mu\text{g m}^{-3}$ en 1984. La concentration maximum annuelle en PM_{10} définie par les différentes réglementations nationales sur la qualité de l'air varie actuellement de 40 à $60 \mu\text{g m}^{-3}$. Pour l'Union Européenne, le seuil sera d'ailleurs abaissé à $20 \mu\text{g m}^{-3}$ par an dès janvier 2010. En matière de particules respirables, la station de Gouré présente donc des valeurs largement supérieures aux normes en vigueur dans les pays développés.

En guise de conclusion par rapport à cette analyse relative à la concentration en particules minérales dans l'air, il nous faut nuancer ces résultats alarmants. En effet, l'année sélectionnée pour cette étude, à savoir 1984, est tout à fait exceptionnelle. Elle correspond à l'année la plus sèche du 20^e siècle dans le Sahel (Nicholson, 1985) et survient à la suite d'une longue série d'années touchées par un déficit pluviométrique aigu (voir Fig. 3). La production de poussières minérales en 1984 a été exceptionnellement élevée partout dans le Sahel (Ozer, 2003). Ainsi, ces concentrations élevées qui sont ici estimées à Gouré pour 1984 doivent assurément être considérées comme un maximum. Une étude similaire menée à Niamey en 2003 (Ozer, 2005) montre néanmoins qu'avec une concentration annuelle de 103 $\mu\text{g m}^{-3}$ en PST et de 67 $\mu\text{g m}^{-3}$ en PM₁₀, la détérioration de la qualité de l'air reste plus que préoccupante lors d'une année qui pourrait être qualifiée de « normale ».

6 Conclusions

L'analyse climatique de la région de Gouré a pour but d'exprimer de la manière la plus précise possible les conditions climatiques dans lesquelles les processus d'invasion des cuvettes par apport éolien ont lieu dans notre région d'étude. L'analyse de la série pluviométrique (1936-2003) de la station de Gouré a clairement mis en évidence trois périodes bien distinctes : une période humide de 1936 à 1967, une période sèche de 1968 à 1987 et une période intermédiaire, plus humide, de 1988 à 2003. La période actuelle se démarque clairement de la période sèche qu'a connue la zone même si elle n'a pas permis un retour aux conditions humides du début de la série chronologique. La saison des pluies s'étend sur une période de deux à trois mois, de juillet à septembre passant, en moyenne, d'environ 50 jours en période humide (11/07 – 31/08) à environ 40 jours en périodes sèche et intermédiaire (16/07 – 25/08), soit une réduction d'une dizaine de jours. Le retour à des conditions plus humides depuis la fin des années 1980 ne semble cependant pas s'accompagner d'une amélioration notable des conditions environnementales. Malgré l'absence de déficit pluviométrique aigu au cours des 16 dernières années, la végétation ne semble pas avoir repris la place qu'elle occupait avant la période de sécheresse. La pression anthropique est l'explication la plus plausible à cette réponse limitée de la végétation à l'amélioration des conditions de précipitations.

L'analyse des données de vent n'a pu s'effectuer que sur la seule année 1984, les données des autres années étant inutilisables suite à la défectuosité de l'anémomètre quand elles n'étaient pas inexistantes. La courbe de fréquence d'occurrence des déflations en fonction des vitesses de vent est en étroite accord avec les résultats de la station de Zinder située à environ 150 km à l'ouest de Gouré. Le vent initialise l'érosion dès 6 m/s et plus de 5% des vents ≥ 7 m/s mettent des particules minérales en suspension. Les mesures de direction des vents sont conformes aux attentes dans cette région à savoir que l'on retrouve les deux directions principales des vents : d'une part l'Harmattan (E-NE dans 49% des cas) et d'autre part les vents d'O-SO (21% des cas). Cependant les résultats de l'année 1984 peuvent ne pas être représentatifs d'une année normale étant donné son caractère particulièrement sec.

La région de Gouré se trouve à la périphérie sud d'une zone source de lithométéores très importante, la dépression du Bodélé. La fréquence des brumes sèches observée par les mesures de visibilité horizontale au niveau de la station météorologique de Gouré est particulièrement élevée rendant la qualité de l'air médiocre, voire malsaine dans près de 20% des jours observés en 1984. S'il est vrai que 1984 constitue une année particulière et que les observations de cette année doivent être considérées comme un maximum, elle montre les conditions de vie particulièrement pénibles que vivent les populations locales.

Non seulement menacées par la mal-nutrition, ces populations doivent en plus subir une qualité de l'air médiocre susceptible de les rendre plus vulnérables à certaines maladies.

La lutte pour le maintien des populations dans les cuvettes du Niger oriental passe par le renforcement et l'amélioration des techniques de fixations des dunes aux alentours des cuvettes car ces zones constituent les seuls lieux permettant une production alimentaire en quantité et qualité suffisantes venant équilibrer les productions céréalières de mil. La qualité alimentaire dans cette zone est d'autant plus importante que la population vit dans un air de qualité médiocre une très grande partie de l'année.

Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre du Programme Interuniversitaire Ciblé (PIC) financé par la Coopération Universitaire au Développement (CUD) de Belgique. La participation de C. Bodart à cette étude a été supportée par la Fondation Alice Seghers de l'Université de Liège. Les auteurs remercient vivement MM. les Professeurs C. Bielders et A. Ozer ainsi que deux relecteurs anonymes pour leurs commentaires et discussions.

Références

- Afeti G.M., Resch F.J., 2000, "Physical characteristics of Saharan dust near the Gulf of Guinea", *Atmospheric Environment*, 34, 1273-1279.
- Alpert P., Ganor E., 2001, "Sahara mineral dust measurements from TOMS: comparison to surface observations over the Middle East for the extreme dust storm, March 14-17, 1998", *Journal of Geophysical Research*, 106, 18275-18286.
- Arléry R., Grisolle H., Guilmet B., 1973, *Climatologie, méthodes et pratiques*, Paris, Gauthier-Villars.
- Artiñano B., Querol X., Salvador P., Rodríguez S., Alonso D.G., Alastuey A., 2001, "Assessment of airborne particulate levels in Spain in relation to the new EU-directive", *Atmospheric Environment*, 36, Suppl. 1, 43-53.
- Baldasano J.M., Valera E., Jiménez P., 2003, "Air quality data from large cities", *The Science of the Total Environment*, 307, 141-165.
- Ben Mohamed A., Frangi J.P., Fontan J., Druilhet A., 1992, "Spatial and temporal variations of atmospheric turbidity and related parameters in Niger", *Journal of Applied Meteorology*, 31, 1286-1294.
- Bielders C.L., Alvey S., Cronyn N., 2001, "Wind erosion : the perspective of grass-roots communities in the Sahel", *Land Degradation and Development*, 12, 57-70.
- Bodart C., 2004, *Etude de l'ensablement dans la région de Gouré (sud-est du Niger): processus et apport de la télédétection*, Mémoire de licence en Sciences Géographiques, Université de Liège.
- Boubel R.W., Fox D.L., Turner D.B., Stern A.C., 1994, *Fundamentals of air pollution*, London, Academic Press.
- Capot-Rey R., 1952, "Les limites du Sahara français", *Travaux de l'Institut de Recherches Sahariennes*, 8, 23-48.
- Carbonnel J.P., Hubert P., 1985, "Sur la sécheresse au Sahel d'Afrique de l'Ouest. Une rupture climatique dans les séries pluviométriques du Burkina Faso (ex Haute Volta)", *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 301, série II, 941-944.
- Chen Y.S., Sheen P.C., Chen E.R., Liu Y.K., Wu T.N., Yang C.Y., 2004, "Effects of Asian dust storms events on daily mortality in Taipei, Taiwan", *Environmental Research*, 95, 151-155.
- Chung Y.S., Kim H.S., Park K.H., Jhun J.G., Chen S.J., 2003, "Atmospheric loadings, concentrations and visibility associated with sandstorms: satellite and meteorological analysis", *Water, Air & Soil Pollution, Focus* 3, 21-40.
- 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.
- Draxler R.R., Gillette D.A., Kirkpatrick J.S., Heller J., 2001, "Estimating PM₁₀ air concentrations from dust storms in Iraq, Kuwait and Saudi Arabia", *Atmospheric Environment*, 35, 4315-4330.
- Eklundh L., Olsson L., 2003, "Vegetation index trends for the African Sahel 1982-1999", *Geophysical Research Letters*, 30, doi: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. (ed.), *Actes des Journées de Climatologie, Mont-Rigi, Belgique, 5-7 novembre 1987*, Liège, Presses Universitaires de Liège, 43-56.
- Fryrear D.W., 1995, "Soil losses by wind erosion", *Soil Science Society of America Journal*, 59, 668-672.
- Gillies J.A., Nickling W.G., McTainsh G.H., 1996, "Dust concentrations and particle-size characteristics of an intense dust haze event: inland delta region, Mali, West Africa", *Atmospheric Environment*, 30, 1081-1090.
- Grall Lieutenant, 1945, "Le secteur nord du cercle de Gouré", *Bulletin de l'Institut Français d'Afrique Noire*, 7, 1-46.

- Griffin D.W., Garrison V.H., Herman J.R., Shinn E.A., 2001a, "African desert dust in the Caribbean atmosphere: Microbiology and public health", *Aerobiologia*, 17, 203-213.
- Griffin D.W., Kellogg C.A., Shinn E.A., 2001b, "Dust in the wind: Long range transport of dust in the atmosphere and its implications for global public and ecosystem health", *Global Change and Human Health*, 2, 20-33.
- Grove A.T., 1958, "The ancient erg of Hausaland and similar formations on the south side of the Sahara", *Geographical Journal*, 124, 526-533.
- Herrmann L., Stahr K., Sponholz B., 1997, "Identifizierung trockenzeitlicher und regenzeitlicher staubquellen im östlichen Westafrika", *Würzburger Geographische Arbeiten*, 92, 189-211.
- 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; contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", New York, Cambridge University Press.
- Hountondji Y.C., Ozer P., Nicolas J., 2004, "Mise en évidence des zones touchées par la désertification par télédétection à basse résolution au Niger", *Cybergeo: Revue Européenne de géographie*, soumis.
- Hubert P., Carbonnel J.P., 1987, "Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest", *Journal of Hydrology*, 95, 165-183.
- Jahiel M., 1998, "Rôle du palmier dattier dans la sécurisation foncière et alimentaire au sud-est du Niger", *Sécheresse*, 9, 167-174.
- Kalu A.E., 1979, "The African dust plume: Its characteristics and propagation across West Africa in winter", in Morales D. (ed.), *Saharan dust: Mobilization, transport, deposition*, New York, Wiley, Scope 14, 95-118.
- 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, Liège, Université de Liège.
- L'Hôte T., Mahé G., Somé B., Triboulet J.P., 2002, "Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues", *Hydrological Sciences Journal*, 47, 563-572.
- Lancaster N., Baas A., 1998, "Influence of vegetation cover on sand transport by wind : Field studies at Owens Lake, California", *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, 69-82.
- Mainguet M., Canon-Cossus L., Chemin M.C., 1979, "Dégradation dans les régions centrales de la République du Niger : Degré de responsabilité de la nature du milieu, de la dynamique externe et de la mise en valeur par l'homme", *Travaux de l'Institut de Géographie de Reims*, 39-40, 61-73.
- Middleton N.J., 1985, "Dust production in the Sahel – Reply to M. Hulme", *Nature*, 318, 488.
- Middleton N.J., Goudie A.S., 2001, "Saharan dust: sources and trajectories", *Transactions of the Institute of British Geographers*, 26, 165-181.
- Morel R., 1995, "La sécheresse en Afrique de l'Ouest", *Revue de Géographie de Lyon*, 70, 215-222.
- 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*, Brussels, Royal Meteorological Institute of Belgium and Royal Academy of Overseas Sciences, 200-211.
- Nicholson S.E., 1985, "Sub-Saharan rainfall 1981-84", *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 24, 1388-1391.
- Nicholson S.E., 2001, "Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries", *Climate Research*, 17, 123-144.
- O'Hara S.L., Wiggs G.F.S., Mamedov B., Davidson G., Hubbard R.B., 2000 "Exposure to airborne dust contaminated with pesticide in the Aral Sea region", *Lancet*, 355, 627-628.
- Ojo O., 1977, *The climates of West Africa*, London, Heinemann.
- Ozer P., 1993, *Contribution à l'étude de la désertification en région sahélienne. Le cas du Niger. Problèmes posés par les précipitations et les lithométéores*, Mémoire de licence en Sciences géographiques, Liège, Université de Liège.
- Ozer P., 2000, "Les lithométéores en région sahélienne: un indicateur climatique de la désertification", *GEO-ECO-TROP*, 24, 1-317.
- Ozer P., 2002, "Dust variability and land degradation in the Sahel", *BELGEO*, 2, 195-209.
- Ozer P., 2003, "Fifty years of African mineral dust production", *Bulletin des Séances de l'Académie royale des Sciences d'Outre-Mer*, 49, 371-393.
- 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., Erpicum M., 1995, "Méthodologie pour une meilleure représentation spatio-temporelle des fluctuations pluviométriques observées au Niger depuis 1905", *Sécheresse*, 6, 103-108.
- Ozer P., Erpicum M., Demarée G., Vandiepenbeeck M., 2003, "The Sahelian drought may have ended during the 1990s", *Hydrological Sciences Journal*, 48, 489-492.
- Papastefanou C., Manolopoulou M., Stoulos S., Ioannidou A., Gerasopoulos E., 2001, "Coloured rain dust from Sahara Desert is still radioactive", *Journal of Environmental Radioactivity*, 55, 109-112.

- Pettitt A.N., 1979, "A non-parametric approach to the change-point problem", *Applied Statistics*, 28, 126-135.
- Prospero J.M., 1999, "Long-term measurements of the transport of African mineral dust to the southeastern United States: Implications for regional air quality", *Journal of Geophysical Research*, 104, 15917-15927.
- Prospero J.M., Ginoux P., Torres O., Nicholson S.E., Gill T.E., 2002, "Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the NIMBUS 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product", *Reviews in Geophysics*, 40, 1002, doi: 10.1029/2000RG000095.
- Rodriguez S., Querol X., Alastuey A., Kallos G., Kakaliagou O., 2001, "Saharan dust contributions to PM10 and TSP levels in Southern and Eastern Spain", *Atmospheric Environment*, 35, 2433-2447.
- Rodriguez S., Querol X., Alastuey A., Viana M., Mantilla E., 2003, "Events affecting levels and seasonal evolution of airborne particulate matter concentrations in the Western Mediterranean", *Environment Science & Technology*, 37, 216-222.
- Rognon P., 1991, "Les sécheresses au Sahel remplacées dans l'évolution climatique des vingt derniers millénaires", *Sécheresse*, 2, 199-210.
- Ryall D.B., Derwent R.G., Manning A.J. et al., 2002, "The origin of high particulate concentrations over the United Kingdom, March 2000", *Atmospheric Environment*, 36, 1363-1378.
- Sene S., Ozer P., 2002, "Evolution pluviométrique et relation inondations – événements pluvieux au Sénégal", *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 42, 27-33.
- Sivakumar M.V.K., 1987, "Predicting rainy season potential from the onset of rains in Southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa", *Agricultural and Forest Meteorology*, 42, 295-305.
- Tegen I., Fung I., 1995, "Contribution to the atmospheric mineral aerosol load from land surface modification", *Journal of Geophysical Research*, 100, 18707-18726.
- Vannitsem S., Demaree G., 1991, "Détection et modélisation des sécheresses au Sahel", *Hydrologie continentale*, 2, 155-171.
- Viana M., Querol X., Alastuey A., Cuevas E., Rodriguez S., 2002, "Influence of African dust on the levels of atmospheric particulates in the Canary Islands air quality network", *Atmospheric Environment*, 36, 5861-5875.
- Washington R., Todd M., Middleton N.J., Goudie A.S., 2003, "Dust-storm source areas determined by the Total Ozone Monitoring Spectrometer (TOMS) and surface observations", *Annals of the Association of American Geographers*, 93, 299-315.
- Wiggs G.F.S., O'Hara S.L., Wegerdt J., van der Meer J., Small I., Hubbard R., 2003 "The dynamics and characteristics of aeolian dust in dryland Central Asia: possible impacts on human exposure and respiratory health in the Aral Sea basin", *Geographical Journal*, 169, 142-157.
- Wilson I.G., 1971, "Desert sandflow basins and a model for the development of ergs", *Geographical Journal*, 137, 180-199.
- Wilson I.G., 1973, "Ergs", *Sedimentary geology*, 10, 77-106.
- World Health Organization, 1979, *Sulfur oxides and suspended particulate matter*, Geneva, WHO, Environmental Health Criteria 8.
- World Health Organization, 2000, *Guidelines for air quality*, Geneva, WHO.
- World Meteorological Organization, 1992, *International Meteorological Vocabulary*, Geneva, WMO.

© CYBERGEO 2005

OZER P., BODART C., TYCHON B., *Cybergeo*, No. 308, 02 mai 2005