

## LES LITHOMÉTÉORES AU NIGER: MISE AU POINT

Pierre OZER,  
Arlon/Belgique

### *Zusammenfassung: Zur Bedeutung atmosphärischer Gesteinsstäube in Niger*

Der Artikel beschreibt die Entwicklung atmosphärischer Gesteinsstäube während der Trockenzeit (Oktober bis April) über einen Beobachtungszeitraum von über 50 Jahren an acht Stationen in Niger. "Atmosphärischer Gesteinsstaub" ist definiert als atmosphärischer Staub aus überwiegend festen Partikeln, die mehr oder weniger in Suspension in der Luft vorliegen oder die vom Boden durch den Wind aufgenommen werden und die horizontale Sichtweite auf weniger als fünf Kilometer reduzieren. Zwei Arten von Gesteinsstäuben werden unterschieden: solche, die in Suspension in der Atmosphäre vorhanden sind, und solche, die unmittelbar am Beobachtungsstandort durch den Wind vom Boden aufgenommen werden. Es zeigt sich, dass die Häufigkeit der Deflationsereignisse die Veränderung der Umweltbedingungen und der geomorphologischen Prozesse in der Region realistisch repräsentiert. An allen Messstationen hat sich die Frequenz der Deflationsereignisse um den Faktor 5-10 erhöht. Alle Stationen liegen im ehemaligen (während der 1950er und 1960er Jahre) oder heutigen Sahelgürtel. Dieser breite Gürtel kennt heute mehr Deflationsereignisse als die eigentlichen Wüstenregionen. So ist die Deflationshäufigkeit in Agadez und Niamey weit höher als die an der Station Bilma beobachtete. Die vorherrschende Bedeutung der Wüstenregion um Bilma als Zone der Bereitstellung von Stäuben, die nach Einbringung in die Atmosphäre in Suspension über den Sahel und die Sudanzone verbreitet werden, ist ernsthaft in Frage gestellt.

### *Summary: Focus on dust production in Niger*

This article describes the evolution of the lithometeors during the dry season (October to April) over fifty years of observations in eight stations of Niger. A lithometeor is defined as a meteor consisting of an ensemble of mostly solid particles, more or less suspended in the air, or lifted by the wind from the ground reducing horizontal visibility below 5 kilometres. Two categories of lithometeors are taken in account: suspended in the air or directly lifted by the wind from the ground (deflation at the place of observation). It is shown that deflation frequency is better appropriate to represent all environmental and geomorphological changes affecting this region. In all analysed stations, deflation frequency has increased by a factor ranging from 5 to 10. All these stations are located in the Sahelian belt. This area is currently experiencing more wind erosion than desert regions. Indeed, deflation frequency is largely higher Agadez and Niamey than in Bilma. The preponderant role of the desert region of Bilma, as a major dust source in Niger is seriously called into question.

dont la plupart sont solides, plus ou moins en suspension dans l'atmosphère, ou soulevées du sol par le vent et réduisant la visibilité horizontale à moins de 5 kilomètres. Deux catégories de lithométéores sont prises en compte suivant qu'ils sont en suspension dans l'atmosphère ou directement mobilisés par le vent (déflation au point d'observation). Il est montré que la fréquence des cas de déflation semble mieux représenter la réalité des mutations environnementales et géomorphologiques affectant cette région. Dans toutes les stations analysées, la fréquence des cas de déflation a été multipliée par un facteur variant de cinq à dix. Toutes ces stations sont localisées dans la bande antérieurement sahélienne (durant les années cinquante et soixante) ou actuellement sahélienne. Cette large bande connaît aujourd'hui plus de cas de déflation que les régions désertiques elles-mêmes. Ainsi, la fréquence des cas de déflation est largement supérieure à Agadez et Niamey que celle observée à la station de Bilma. Le rôle prépondérant de la région désertique de Bilma, en tant que zone génératrice de poussières qui, après avoir été injectées dans l'atmosphère, dérivent par suspension sur les régions sahéliennes et soudanaises, est sérieusement remis en question.

## 1. Introduction

Les processus éoliens sont de première importance dans les régions arides et semi-arides et résultent des interactions entre le vent et la surface des sols. Ils sont dès lors extrêmement sensibles aux changements tant des paramètres climatiques que des conditions de surface du sol. Ces changements incluent:

- les changements globaux;
- les changements ou accidents climatiques à court ou moyen terme comme par exemple, les sévères vagues de sécheresse en région sahélienne durant les années septante et quatre-vingts;
- les impacts anthropiques sur l'environnement.

En Afrique, la source majeure des poussières et du sable est considérée comme étant le désert du Sahara. Cette zone source injecterait approximativement la moitié de la production mondiale de poussières minérales dans l'atmosphère (COUDE-GAUSSSEN & ROGNON 1983; SCHLESINGER *et al.* 1990; GOUDIE 1996). Les poussières et le sable soulevés par le vent, que nous nommerons lithométéores, sont fréquemment transportés sur des centaines de kilomètres voire même, pour ce qui est du matériel le plus fin, sur plusieurs milliers de kilomètres.

L'intérêt pour l'analyse de l'évolution des poussières terrigènes dans cette région du continent africain ne s'est développé que dans la seconde moitié des années quatre-vingts avec la publication des travaux de MIDDLETON (1985) portant sur quelques stations de la Mauritanie et du Soudan. Ces dernières années, un nouvel engouement est apparu pour l'étude des lithométéores. En effet, différents auteurs suggèrent que l'augmentation de

l'activité éolienne en Afrique de l'Ouest, ainsi que dans la majeure partie des régions arides et semi-arides du globe, pourrait être une réponse des processus éoliens au changement global (LANCASTER 1996B) et que les lithométéores pourraient modifier la circulation atmosphérique globale (ANDREAE 1996; LI *et al.* 1996; TEGEN *et al.* 1996; ALPÈRT *et al.* 1998). Cependant, force est de constater que, même si la compréhension scientifique du transport de poussières éoliennes sur de longues distances a considérablement augmenté durant ces vingt dernières années (MORALES 1979; PEWE 1981; PYE 1987; LEINEN & SARNTHEIN 1989; COUDE-GAUSSSEN 1991; NASH 1999; etc.), les études détaillées concernant directement la production de poussières au Sahel restent rares.

Cette étude se base sur les observations des lithométéores réalisées en huit stations synoptiques au Niger (Fig. 1). L'évolution de cet élément climatique est analysé en saison sèche, à savoir d'octobre à avril, et pour la période s'étendant de 1947 à 1998.

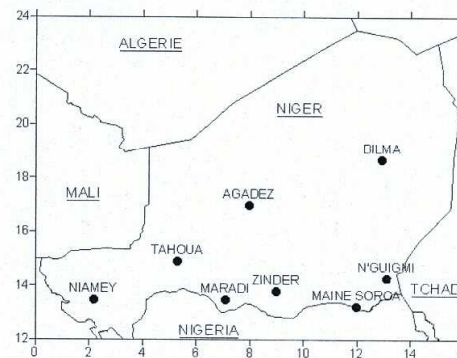


Figure 1: Localisation des stations synoptiques du Niger utilisées dans notre étude.

## 2. Contexte environnemental

Au cours de ces trente dernières années, la bande sahélienne a été touchée par le plus important déficit pluviométrique du siècle (Fig. 2) ainsi que par divers processus de dégradation de l'environnement menant progressivement à la désertification 'généralisée' de la région d'étude. La croissance exponentielle d'une population quasi intégralement dépendante de son environnement direct, le déboisement, le surpâturage, la surexploitation des

terres et la détérioration des sols sont les principales causes anthropiques de la désertification affectant la région sahélienne.

La population humaine dans notre zone d'étude, grâce aux progrès de la médecine, aux campagnes de vaccination, aux apports alimentaires lors de mauvaises récoltes et aux autres types d'aides à tous les niveaux en provenance des pays riches du Nord (WICKENS 1997), connaît -au même titre que tous les pays du Tiers-Monde- un accroissement de type exponentiel surtout depuis les années cinquante. Mis à part STEBBING (1935) et AUBREVILLE (1949), c'est dès la fin des années cinquante, en pleine période humide, que plusieurs auteurs ont mis l'accent sur la dégradation anthropique de l'environnement et ont dénoncé avec vigueur certaines pratiques néfastes. Ainsi, TRICART (1959) écrivait (p. 342): "*La mise à vif des sables s'avère donc être essentiellement, en zone sahélienne, un phénomène anthropique, imprudemment accru par certaines mesures malheureuses, comme la fixation des nomades et par le développement de l'élevage du petit bétail. Il aboutit à une dégradation de la nature ... Cela réduit les pâturages, accroît la sécheresse climatique, et menace les sols cultivables, dont la fraction la plus fertile, le limon, est exportée au loin par les trombes*". Les recherches de DRESCH et ROUGERIE (1960) confirmaient les dires de TRICART (p. 49): "*Des photographies aériennes prises au cours d'une période de 17 ans montrent nettement la rapidité avec laquelle une petite région désertique peut se former. De mauvaises méthodes de cultures et, peut-être, le surpâturage sont à l'origine de la formation de dunes*".

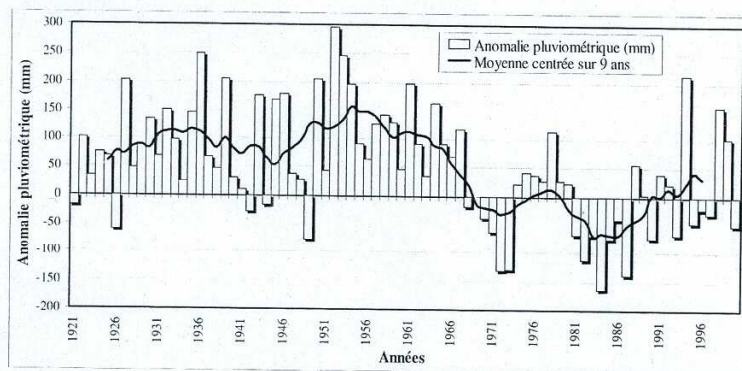


Figure 2: Evolution de l'anomalie pluviométrique au Niger exprimée en mm, par rapport à la moyenne de la période 1961-1990 (397 mm), de 1921 à 2000.

Depuis ces réflexions, l'installation de la sécheresse n'a fait qu'aggraver les impacts anthropiques sur l'environnement. Toutes les études environnementales multi-temporelles menées dans le Sahel présentent des résultats similaires (CHAMARD & COUREL 1979; ANHUF *et al.* 1990; KUBEROW 1990; KARIMOUNE 1994; LINDQVIST & TENGBERG 1994; PARE & TALLET 1999; N'DJAJA OUAGA & COUREL 2000): une diminution importante des forêts et de la végétation en général contrastant avec une augmentation remarquable des sols dégradés qui se marque souvent par une remise en mouvement du sol par la déflation éolienne. A titre d'exemple, le travail de KARIMOUNE (1994), réalisé à partir de la comparaison de photographies aériennes et d'une image satellitaire SPOT, a mis en évidence la sévère dégradation environnementale dans la zone semi-aride de Makaoratchi-Gayi, département de Zinder au sud-est du Niger caractérisée par une pluviométrie annuelle moyenne de l'ordre de 350 mm. Il est ressorti de ses investigations que les zones colonisées par la végétation se sont fortement contractées entre 1957 et 1987 en représentant 36% et 8%, respectivement, du secteur étudié. Dans le même temps, la remobilisation des sables a progressivement affecté des superficies plus étendues et intéresse en particulier les sommets des dunes et les auréoles autour des villages. Les zones concernées par les sables remaniés sont ainsi passées de 6% à 23% en trente années. Finalement, une zone montre la disparition du sol faisant apparaître une cuirasse latéritique là même où le sol était recouvert d'une végétation relativement dense à la fin des années cinquante. Cet exemple précis prouve que la dégradation dite irréversible peut survenir très rapidement.

Dans le même temps, une nouvelle caractéristique climatique s'est développée en Afrique de l'Ouest: les lithométéores. L'observation de ces particules minérales en suspension dans l'atmosphère ou soulevées du sol par le vent était, avant les années septante, essentiellement limitée à la zone désertique (DUBIEF 1943; MORAL 1965). En pleine période de sécheresse, LEROUX (1983), dans son ouvrage remarquable consacré au climat de l'Afrique tropicale, considérait toujours les lithométéores comme étant un '*élément climatique mineur*'.

C'est dans ce contexte environnemental accusant de profondes modifications que s'inscrit cette étude relative aux lithométéores au Niger.

### 3. Données utilisées

La variable utilisée dans ce travail pour quantifier l'importance et l'évolution des matières solides dans l'atmosphère est la visibilité

horizontale (VV): "Distance maximale à laquelle un observateur peut voir et identifier un objet situé à proximité du plan horizontal où il se trouve lui-même" (OMM 1992). Celle-ci est reportée dans les carnets d'observations ainsi que dans les Tableaux Climatologiques Mensuels (TCM). La visibilité chiffrée dans les messages synoptiques est la visibilité horizontale minimale observée quel que soit le secteur d'observation. Cette visibilité est altérée par les hydrométéores ou par les lithométéores. Dans le cadre de cette étude, nous nous focaliserons uniquement sur les lithométéores.

Un lithométéore est défini par l'OMM (1992) comme un "météore 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". En outre, les lithométéores réduisent la visibilité horizontale à moins de 5 kilomètres ( $VV < 5$  km).

Deux catégories de lithométéores sont prises en compte suivant qu'ils sont en suspension dans l'atmosphère ou directement mobilisés par le vent (Tab. 1):

Tableau 1: Nomenclature des lithométéores utilisés dans notre étude.

Nomenclature	ww	Particularités	VV (dam)
Brume sèche	05	Transport de particules solides sans dépôt	< 500
Brume de poussière	06	Transport de particules solides avec dépôt	< 500
Chasse-sable	07	Déflation éolienne	< 500
Tempête de sable	09 et 30 à 36	Déflation éolienne massive	< 100

- Les lithométéores qui ont plus ou moins le caractère de suspension dans l'atmosphère sont: la brume sèche et la brume de poussière.
- Les lithométéores directement mobilisés par le vent au moment de l'observation sont: chasse-sable et tempête de sable.

Dans la suite de cette étude, le terme 'lithométéore' désignera les quatre types de manifestations de poussière ou de sable dans l'atmosphère repris au tableau 1 (soit suspension et déflation) et le terme 'cas de déflation' désignera les chasses-sable et tempêtes de sable réunis.

Les données relatives à la visibilité horizontale et aux lithométéores ont été initialement tirées des Tableaux Climatologiques Mensuels que nous avons consultés à la Direction de la Météorologie Nationale du Niger. Ces données ont été systématiquement vérifiées dans les carnets d'observations contenant les observations horaires.

Rares sont les études concernant l'évolution à long terme (> 20 ans) des lithométéores en Afrique sahélienne. A vrai dire, seuls cinq auteurs ont réalisé des investigations dans ce domaine et cette région. Le premier,

DUBIEF (1952) présente une carte de la fréquence de la déflation dans le sud du Sahara pour une période de 25 ans s'arrêtant en 1950, deux autres se sont intéressés à la Mauritanie (MIDDLETON 1985; NOUACEUR 1999) et le dernier au Niger (OZER 1998). La seule étude concernant le Sahel a été réalisée par N'TCHAYI *et al.* (1997) et compare les informations relatives aux brumes sèches collectées pour 19 stations réparties en Afrique de l'Ouest pour trois périodes de cinq ans (1957-1961, 1970-1974 et 1983-1987).

Nous proposons ci-après l'étude, tant des lithométéores que des cas de déflation, sur une période d'une cinquantaine d'années. L'analyse des seuls cas de déflation est extrêmement importante puisqu'elle permettra d'individualiser les zones sources de poussière au Niger.

## 4. Resultats

### 4.1. Evolution de la fréquence des lithométéores

Les résultats relatifs à l'évolution de la fréquence du nombre de jours affectés par des lithométéores en saison sèche sont présentés à la figure 3. Sur cette figure, les stations sont systématiquement disposées, de haut en bas, de la plus sèche à la plus humide, soit du climat désertique au climat sud-sahélien. La longue période considérée nous permettra de pouvoir appliquer le test statistique de PETTITT (1979), repérant les ruptures de tendance dans les séries climatiques.

La station désertique de Bilma, seule station représentative de la zone source dite de Bilma-Faya Largeau (BERTRAND *et al.* 1979; KALU 1979; MCTAINSH & WALKER 1982; etc.), présente une évolution assez surprenante. Une augmentation subite d'un facteur 3 est remarquée dès le début des années soixante. La fréquence maximum des jours affectés par les lithométéores apparaît au début des années septante (1968-1975) avec une moyenne sur cinq ans proche de 90 jours (Fig. 3). Après cette période, cette fréquence moyenne retombe directement à des valeurs plus modérées (de l'ordre de 40 jours par saison sèche); une rupture de tendance à la baisse est observée en 1977. Au début des années nonante (1990), une nouvelle rupture de tendance à la baisse est notée (Tab. 2). Une fréquence inférieure à celle des années cinquante est alors observée. Le rôle de la zone source de Bilma-Faya Largeau sera discuté par après.

Ailleurs, toutes les stations sahéliennes ont connu une augmentation importante des lithométéores dès la fin des années soixante. L'application du test de PETTITT (1979) à ces sept stations détecte une première rupture de

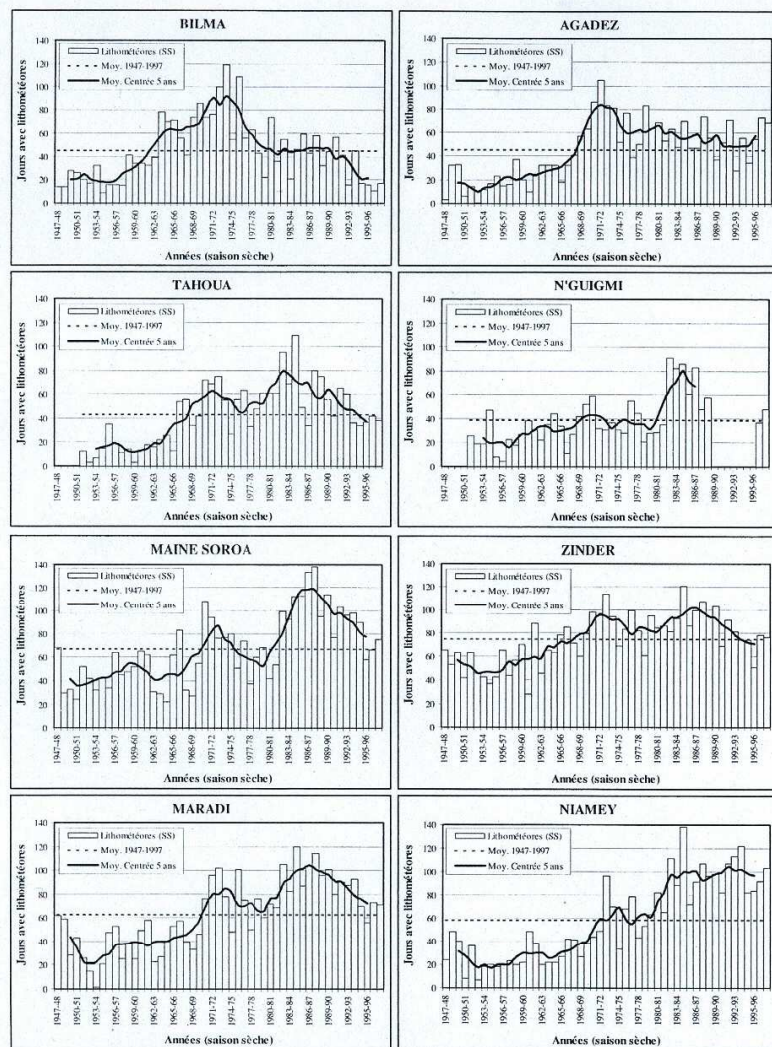


Figure 3: Evolution du nombre de jours affectés par les lithométéores en saison sèche (octobre - avril) au Niger de 1947-48 à 1997-98. La moyenne détermine la période utilisée pour chaque station.

tendance entre 1965 et 1970 (Tab. 2). Le maximum de jours affectés par les lithométéores est alors atteint au paroxysme de la sécheresse du début des années septante (entre 1970 et 1973). La deuxième moitié des années septante est alors marquée par une légère diminution des lithométéores. Cependant, les valeurs enregistrées restent néanmoins supérieures à la fréquence moyenne de la période 1947-1997.

Tableau 2: Années des points de rupture calculées par l'application du test de tendance de PETTITT (1979) aux séries des précipitations (CT P) et des fréquences des lithométéores. CT M: Changement de tendance - Majeur, CT Sa: Changement de tendance - Secondaire antérieur, CT Sp: Changement de tendance - Secondaire postérieur, [+] et [-] indiquent la tendance du changement.

Station	CT P	CT M	CT Sa	CT Sp	CT autre
Bilma	1969 [-]	1962 [+]	1957 [+]	1977 [-]	1990 [-]
Agadez	1968 [-]	1967 [+]	1957 [+]		
Tahoua	1968 [-]	1966 [+]			
N'Guigmi	1966 [-]	1967 [+]		1981 [+]	
Mainé Soroa	1967 [-]	1969 [+]		1981 [+]	
Zinder	1966 [-]	1968 [+]	1960 [+]		
Maradi	1970 [-]	1969 [+]			
Niamey	1969 [-]	1970 [+]	1959 [+]	1981 [+]	

Ces constatations sont confirmées par les observations réalisées en d'autres stations sahéliennes du réseau nigérien (Tillabéri et Birni N'Konni [série 1961-1990, VV < 500 dam], in OZER 1993) et nigérien (Samaru [série 1962-1973, VV < 300 dam], in ADETUJINI *et al.* 1979; Potiskum, Maiduguri et Sokoto [série 1955-1979, VV < 100 dam], in GOUDIE & MIDDLETON 1992). Par après, une seconde augmentation des lithométéores se manifeste partout, à l'exception de la station d'Agadez, au début des années quatre-vingts. La fréquence des lithométéores est extrêmement élevée durant la saison sèche 1984-1985. Plus d'un jour sur deux est alors affecté par des visibilités inférieures à 5 km, ces valeurs sont partout plus de deux fois supérieures à la fréquence moyenne des lithométéores de 1947-1997. Par contre, la station subdésertique d'Agadez n'est pas touchée par cette brusque augmentation. Aucune année des deux dernières décennies de la série analysée n'a connu une fréquence similaire à celle observée durant la première moitié des années septante.

Après 1987, de Tahoua à Maradi, la fréquence des lithométéores a lentement régressé. Les fréquences restent néanmoins généralement supérieures à la moyenne. Ces dernières années, cette fréquence a rejoint la moyenne aux stations de Tahoua et Zinder. A la station de Niamey, la situation est atypique. La fréquence des lithométéores y reste en

permanence au niveau des valeurs atteintes au début des années quatre-vingts, soit près d'un jour sur deux avec une visibilité < 5 km. La capitale du Niger est devenue, ces dix dernières années, la région la plus affectée par des particules terrigènes.

Comme nous l'avons déjà mentionné, toute la région étudiée a été marquée, au moins à une reprise, par des modifications importantes de la fréquence des lithométéores. Les résultats de l'application du test de PETTITT (1979), repérant les ruptures de tendance dans les séries climatiques sont présentés au tableau 2. Il apparaît clairement que le changement de tendance majeur est apparu fin des années soixante: toutes les stations semi-arides analysées présentent un point de rupture significatif entre 1966 et 1970. Celui-ci sera suivi par une autre rupture de tendance à la hausse significative au début des années quatre-vingts, celle-ci se présentant en 1981 dans trois stations sur sept. Notons que, depuis ces ruptures de tendance simple ou double à la hausse, le test de PETTITT (1979) ne détecte aucune tendance inverse, à l'exception de la station désertique de Bilma.

Préalablement à ces deux changements à la hausse correspondant aux deux grandes périodes de sécheresse, le test de PETTITT (1979) a également identifié un point de rupture entre 1957 et 1960 dans 50% des stations. Cependant, ce point de rupture peut être dû à un biais engendré d'une part, par la courte série sur laquelle le test est effectué (<20 données) et, d'autre part, par la très faible fréquence de lithométéores durant cette période. L'application du test de PETTITT (1979) à de plus longues séries (1930-1997) des stations de Tombouctou, Gao, Mopti et Kayes montre la non-existence de changement de tendance avant la période correspondant à l'avènement de la grande sécheresse (OZER 2000).

#### 4.2. Evolution de la fréquence des cas de déflation

Habituellement, l'étude simple de la fréquence des lithométéores mène les chercheurs à tirer des conclusions sur le rôle potentiel de telle ou telle région dans l'injection de poussières dans l'atmosphère, ou dans la transformation éventuelle d'une zone géomorphologiquement stable à une zone de déflation et vice-versa. C'est le cas, par exemple, pour BERTRAND *et al.* (1979) et N'TCHAYI *et al.* (1997) qui utilisent les fréquences des brumes sèches pour déterminer la répartition des zones sources de poussières ainsi que leurs déplacements dans le temps. Or, la brume sèche est un paramètre inadéquat car le transport par le vent fait suite à la déflation qui a pu se produire à des centaines de kilomètres de l'endroit où les particules en suspension sont observées.

D'autres auteurs, parmi lesquels GOUDIE (1978), MIDDLETON (1985, 1989), GOUDIE et MIDDLETON (1992), OZER (1993, 1998) et NOUACEUR (1994) ont fait une erreur similaire en tenant compte de tous les lithométéores (suspension et déflation) selon différents critères de visibilité. Ainsi, lors de l'analyse de la figure 5, reprenant la répartition spatiale des lithométéores durant la période 1951-1968, on pourrait conclure que la station de Zinder est la plus importante zone source de poussières de toute l'Afrique de l'Ouest, bien plus productive que la région désertique de Bilma. Or, on sait qu'il n'en est rien grâce, entre autres, aux travaux de CAPOT-REY (1952), GROVE (1958) et WILSON (1971, 1973) qui décrivaient toujours les ergs hérités de la région de Zinder comme étant totalement fixés par la végétation et ceux de MAINGUET *et al.* (1979), pour qui les dunes étaient toujours fixées par la végétation et peu dégradées par les actions humaines en 1975.

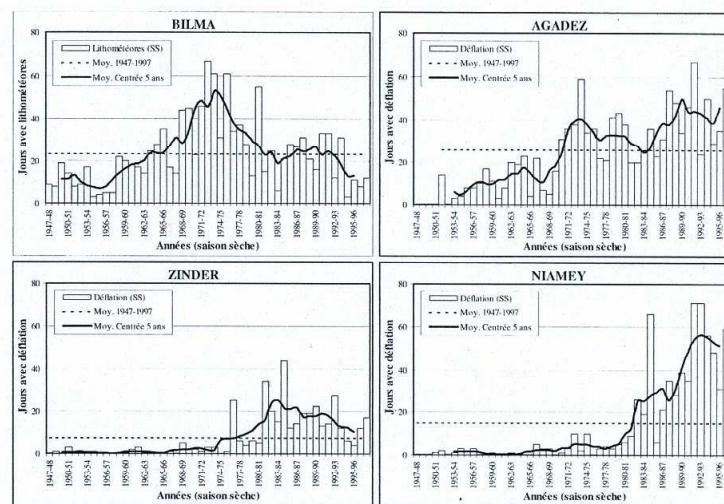


Figure 4: Evolution des cas de déflation en saison sèche (octobre - avril) au Niger de 1947-48 à 1997-98. La courbe moyenne (pointillés) détermine la période utilisée pour chaque station.

Aussi, proposons-nous ci-après de discuter l'évolution temporelle des occurrences de l'observation des phénomènes de déflation, à savoir les

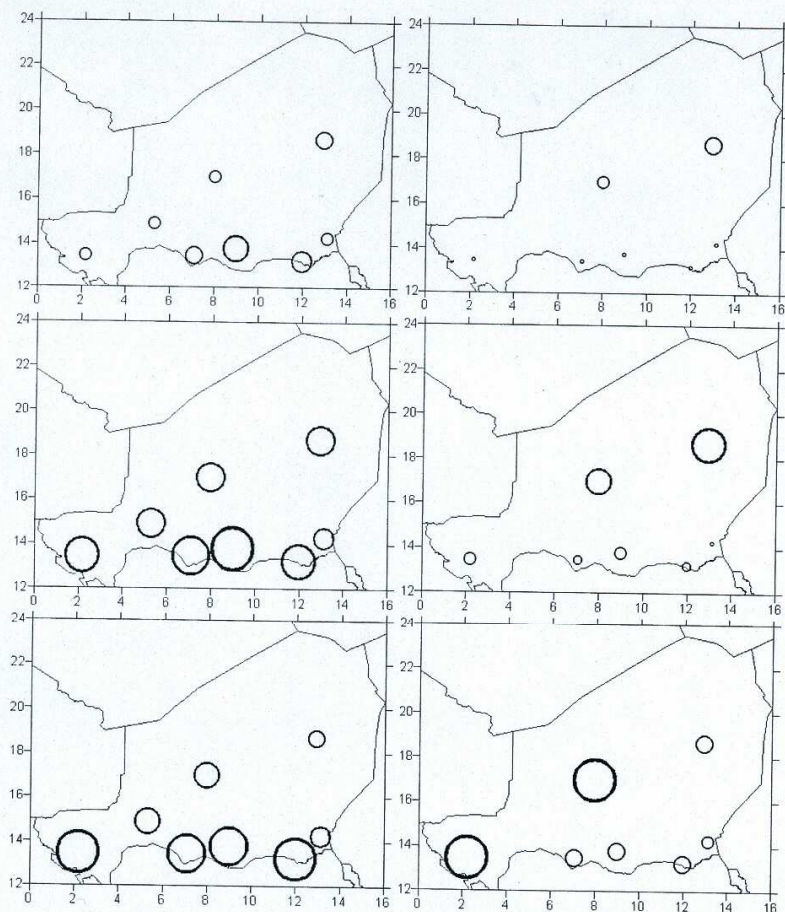


Figure 5: Répartition des lithométéores (gauche) et des cas de déflation (droite) durant les périodes [A] "humide" (1951-1968), [B] de sécheresse (1969-1986) et [C] "actuelle" (1987-1997).

phénomène de chasse-sable et de tempêtes de sable, en saison sèche (octobre à avril) pour vérifier l'hypothèse selon laquelle les zones sources de poussières ont bien migré vers le sud. Cette évolution temporelle est présentée à la figure 4 pour quelques stations sélectionnées.

La station de Bilma présente la même évolution que celle observée pour tous les lithométéores (Fig. 3), soit une augmentation de la fréquence des cas de déflation dès le début des années soixante qui atteint son maximum de 1968 à 1975, suivie par une période de déclin dès le début des années quatre-vingts et aggravée durant les dernières années analysées.

A Agadez, par contre, les cas de déflation sont en permanente augmentation. Une rupture de tendance importante se marque en 1970. Cette évolution contraste avec l'évolution des lithométéores (Fig. 3) qui, elle, est en baisse progressive depuis le milieu des années septante. Ceci signifie donc que les poussières en suspension ont connu une fréquence fortement inférieure durant ces deux dernières décennies, soit la période pendant laquelle l'activité éolienne a été moins marquée dans la région de Bilma (Fig. 4).

A la station de Zinder, les cas de déflation sont rares jusqu'en 1975. Après cette date, la fréquence des chasse-sable et tempêtes de sable augmente rapidement. MAINGUET (1977) le remarque directement et écrit, à propos de l'erg Haoussa (au nord et à l'est de Zinder): "(On constate que la déflation) ne s'achève pas, actuellement, à la limite méridionale du Sahara, à l'isohyète 150 mm, mais se poursuit à travers le Sahel jusqu'à l'isohyète 625 mm, et que la bande de territoire comprise entre ces deux isohyètes correspond aux secteurs de réactivation actuelle du manteau sableux". Le maximum absolu de déflation est atteint durant la saison sèche faisant suite à l'année extrêmement sèche de 1984. Ces constatations sont en accord avec les observations géomorphologiques réalisées dans la région de Zinder par CAPOT-REY (1952), GROVE (1958), WILSON (1971, 1973), MAINGUET *et al.* (1979), KARIMOUNE (1994) et JAHIEL (1998).

En ce qui concerne la station sahélienne de Niamey, comme à Zinder, les trente premières années de la série analysée présentent une fréquence quasi nulle des cas de déflation, exception faite de petits sursauts durant les années sèches de 1972-73 et 1974-75. Pendant la deuxième moitié des années septante, la fréquence des observations de chasse-sable et tempêtes de sable augmente lentement avant de connaître une occurrence dramatique de près d'un jour de déflation sur trois durant la saison sèche 1984-85. La tendance à la hausse se renforce dès 1987 et atteint la plus forte fréquence des cas de déflation du Niger, toutes régions confondues, durant les années nonante.

#### 4.3. Représentation spatiale et synthèse des résultats

La répartition spatiale des occurrences moyennes du nombre de jours affectés par des lithométéores et par des cas de déflation durant la saison sèche (octobre à avril) est présentée à la figure 5. Pour tenir compte de l'évolution temporelle de ces fréquences, la période d'étude est scindée en trois périodes caractéristiques: "humide" (1951-1968), de sécheresse (1969-1986) et "actuelle" (1987-1997). Le contraste entre la période "humide" et les deux suivantes est flagrant.

L'évolution de l'occurrence du nombre de jours affectés par des lithométéores entre les périodes de sécheresse (1969-1986) et "humide" (1951-1968) montre une augmentation généralisée des lithométéores. Globalement, le Niger présente une hausse de l'occurrence des lithométéores qui varie entre 50 et 200 %. L'évolution de l'occurrence des lithométéores entre les périodes "actuelle" (1987-1997) et de sécheresse (1969-1986) est plus contrastée (Fig. 5). Dans les stations septentrionales, cette évolution est en baisse (Agadez et Bilma). Cependant, la majorité des stations enregistrent une augmentation pouvant atteindre 50 % (Niamey).

Pour ce qui est des cas de déflation, la figure 5 relative à la période "humide" (1951-1968) correspond très bien aux informations relatives aux années cinquante et soixante relatées dans différentes analyses géomorphologiques (CAPOT-REY 1952, 1957; GROVE 1958; WILSON 1971, 1973; MAINGUET *et al.* 1979; KARIMOUNE 1994; etc.) et climatiques (DUBIEF 1943, 1952). La zone désertique, représentée ici par la station de Bilma, est bien l'unique zone de génération de sable et poussières au Niger. Au sud de l'isohyète de 150 mm, les ergs étaient alors partout décrits comme fixés par la végétation.

La période de sécheresse voit une augmentation importante de la fréquence des cas de déflation dans le nord du Niger à Agadez et Bilma. On assiste donc probablement à une remise en mouvement des dunes préalablement fixées dans le Sahel septentrional. Ailleurs, dans les stations méridionales, les cas de déflation se développent mais leur fréquence reste faible. Cette tendance va se confirmer durant la période 1987-1997. Les stations du Sahel septentrional sont probablement devenues les zones principales de génération de poussières atmosphériques. Plus au sud, dans le Sahel, la fréquence reste modérée mais est néanmoins significative car elle devient l'équivalent de Bilma.

Le choix du paramètre analysé est essentiel en fonction de ce que l'on désire étudier. Pour ce qui est de la turbidité atmosphérique, du transport de poussières, etc., le paramètre "lithométéore" convient probablement. Par contre, en ce qui concerne la localisation et la productivité d'une zone

source, seule l'analyse de la fréquence des cas de déflation est adéquate du point de vue climatique. L'évolution de ce paramètre semble en accord avec toutes les observations géomorphologiques relatives par différents chercheurs.

Selon N'TCHAYI *et al.* (1997), les zones de Bilma et Agadez ne sont plus des zones sources génératrices des poussières envahissant le Sahel. Les auteurs basent cette conclusion sur l'enregistrement d'une baisse significative de la fréquence des brumes sèches entre les périodes 1970-1974 et 1983-1987. Notre analyse de la fréquence de tous les lithométéores nous a mené à tirer des conclusions similaires. Or, l'analyse des cas de déflation nous a montré que la station d'Agadez, directement sous le vent de la région de Bilma, est de plus en plus productrice. L'analyse des figures 3 et 4 explique cette erreur d'interprétation. Durant la période 1970-1974, la fréquence des brumes sèches était à son plus haut niveau, correspondant exactement au maximum de déflation observé à la station de Bilma (Fig. 4). Par la suite, les deux diminutions de fréquence des cas de déflation à Bilma se sont traduites directement par la raréfaction des observations de poussières en suspension à Agadez. Ceci a eu pour conséquence directe d'influer négativement sur la tendance générale des lithométéores, masquant l'augmentation des cas de déflation locaux. Ces dernières années, les lithométéores observés à Agadez sont essentiellement des cas de déflation, ce qui contribue à prouver que la station de Bilma n'influence presque plus la zone d'Agadez et, donc, le Sahel. Notons d'autre part que, à la station de Niamey, la fréquence des cas de déflation est devenue supérieure à celle des poussières en suspension ces dernières années.

#### 5. Discussion à propos des la zone source de Bilma – Faya Largeau

Nous pensons qu'il est ici opportun de discuter le cas de Bilma, station reconnue comme étant la zone principale de production de poussières en Afrique de l'Ouest orientale (Niger, Nigeria, Burkina Faso et tous les pays du Golfe de Guinée) en hiver (saison sèche).

Comme nous l'avons noté ci-devant, la station de Bilma a connu une augmentation subite d'un facteur 3.5 dès le début des années soixante avec une fréquence maximum des lithométéores durant la période 1969-1975. C'est précisément durant cette période que quelques études ont été réalisées par différents chercheurs concernant la répartition spatiale des lithométéores en Afrique de l'Ouest et mettant en évidence la zone de Bilma – Faya Largeau comme étant la zone source principale de poussières affectant la région sahélienne.



Ainsi, d'une part, BERTRAND *et al.* (1979) ont analysé la répartition spatiale des brumes sèches en se basant sur la période 1970-1973 et ont alors noté que la fréquence des brumes sèches était extrêmement élevée à Bilma, prouvant de la sorte que cette station était probablement la zone source de poussières affectant couramment l'Afrique de l'Ouest orientale depuis les stations de Zinder et Agadez, directement sous le vent de Bilma, jusqu'aux côtes du Golfe de Guinée (Fig. 6). Quant à la fréquence extrêmement faible des brumes sèches observée à Faya Largeau, elle est expliquée par ces auteurs par le fait que la station synoptique est fort probablement localisée légèrement au nord-est de la zone source proprement dite.

D'autre part, KALU (1979) s'est basé sur l'étude des situations synoptiques durant les années 1974 et 1975 pour soutenir l'hypothèse que la région de Bilma – Faya Largeau est la zone génératrice principale de poussières sahariennes affectant la région sahélienne. Il conclut: "Il y a différentes zones génératrices de poussières sahariennes, mais celle responsable de l'existence de lithométéores au Nigeria et dans les pays limitrophes est la région de Bilma – Faya Largeau. Ceci est confirmé par différents types d'observations dans cette région ainsi que par la trajectoire NE-SW des nuages de poussière".

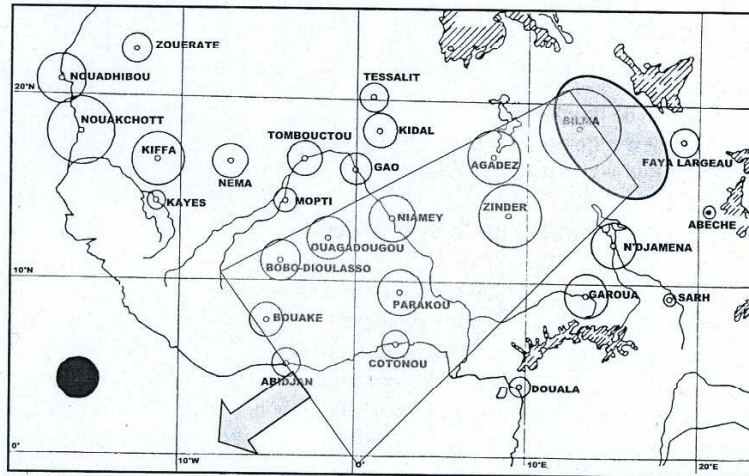


Figure 6: Fréquence annuelle des lithométéores en Afrique de l'Ouest de 1970 à 1973. Zone source décrite par BERTRAND *et al.* ainsi que direction des nuages (d'après BERTRAND *et al.* 1979, modifié).

Ces deux travaux étaient d'ailleurs confirmés par des évidences géomorphologiques (WILSON 1971, 1973; MAINGUET *et al.* 1979; etc.) qui montrent des courants éoliens de transport de particules dans le Sahara du nord-est au sud-ouest, soit exactement dans la direction des poussières présentée à la figure 6, c'est-à-dire selon la direction générale de l'alizé.

Du fait d'une courte période d'analyse de deux ou quatre ans correspondant au maximum absolu de la fréquence de lithométéores à Bilma, il ressort une conclusion indiscutable et correspondant à une logique simple (déflation dans les ergs désertiques suivie du transport vers la région sahélienne) qui sera automatiquement assimilée par la communauté scientifique internationale et que l'on retrouve encore systématiquement à l'heure actuelle dans la majeure partie des publications relatives à ce sujet. Ainsi, LANCASTER nous rapporte récemment (1996A) que la zone source saharienne majeure injectant des poussières dans l'atmosphère, lesquelles atteignent ensuite le Sahel, est la dépression de Bilma – Faya Largeau, citant de la sorte KALU (1979). De même, GOUDIE (1996) considère toujours la zone de Bilma – Faya Largeau comme étant la zone source principale de poussières en Afrique de l'Ouest durant l'hiver en se basant sur un ouvrage de MIDDLETON qui lui-même reprend les résultats de BERTRAND *et al.* (1979) et KALU (1979).

Cependant, après cette date (1975), la fréquence retombe directement à des valeurs plus modérées avant de retrouver, au début des années nonante, une fréquence proche de celle des années cinquante. Le rôle de la région de Bilma – Faya Largeau comme zone source principale des lithométéores dans le Sahel nigérien a d'ailleurs été remis en question dernièrement par N'TCHAYI *et al.* (1997) et OZER (1998) à partir de l'analyse de la fréquence des lithométéores.

Par ailleurs, il ressort d'une étude relative aux types morphodynamiques des dunes dans la région de Bilma, que le bilan sédimentaire éolien est actuellement positif dans toute la région (STENGEL 1992). Un changement significatif dans le bilan sédimentaire serait apparu entre 1987 et 1990, soit au même moment que le deuxième point de rupture à la baisse calculé par le test de PETTITT (1979) sur la fréquence des cas de déflation.

Dans le même ordre d'idée mais à partir de *proxy-data*, TEGEN et FUNG (1994) ont mis en évidence que les modèles globaux tridimensionnels développés pour l'étude du cycle de poussières minérales dans l'atmosphère avaient toujours exclu les sources de poussières potentielles influencées par divers impacts anthropiques comme, par exemple, les nouvelles superficies récemment exposées à la déflation à cause du surpâturage, de la pression anthropique et de la désertification en général. Pour ces auteurs, ce serait la raison pour laquelle il est toujours admis que

les régions désertiques sont les zones sources de lithométéores pour le Sahel. En outre, suite à la comparaison des résultats dérivés des modèles globaux et des informations délivrées par l'analyse des images satellitaires NOAA-AVHRR, ils émettent l'hypothèse que les zones désertiques non perturbées pourraient, contrairement aux postulats scientifiques, être peu actives dans l'injection de poussières terrigènes dans l'atmosphère. Ils concluent que le simple fait d'intégrer les nouvelles zones soumises aux modifications anthropiques sur l'environnement devrait augmenter de manière significative le rôle du Sahel comme zone de production de poussières et que ce dernier pourrait éventuellement être plus important que le Sahara.

L'année suivante, les mêmes auteurs (TEGEN & FUNG 1995) présentent un modèle global tridimensionnel dédié à l'étude du cycle de poussières minérales dans l'atmosphère intégrant les sources potentielles dues à des perturbations récentes (<20 ans), à savoir les sols affectés par les activités humaines (extension des cultures et déboisement) et par les variations climatiques (évolution climatique de la limite entre le Sahara et le Sahel). Il ressort alors de ce modèle que la zone la plus affectée par l'érosion éolienne est le Sahel s'étendant approximativement du sud-est du Niger au nord-ouest de la Boucle du Niger (Mali). La zone de Bilma – Faya Largeau est très peu active (approximativement 15% du maximum sahélien). Il apparaît, qu'au minimum 50 % des poussières injectées dans l'atmosphère proviennent des nouvelles sources potentielles (sols perturbés). Pour TEGEN et FUNG (1995), l'activité saharienne est donc, ces dernières années, réduite à sa plus simple expression et les auteurs mettent l'accent sur les effets climatiques potentiels de ces "poussières anthropiques" (dans le sens où s'il n'y avait pas eu de dégradation environnementale due à l'impact humain, l'érosion éolienne au Sahel serait bien plus limitée).

## 6. Discussion et conclusion

Dans cet article consacré à l'évolution des lithométéores durant la saison sèche (octobre à avril) sur plus de cinquante années d'enregistrement, il ressort que la fréquence des lithométéores a fortement augmenté partout à l'exception de la région de Bilma. Le rôle prépondérant de cette région désertique, en tant que zone génératrice de poussières qui, après avoir été injectées dans l'atmosphère, dérivent par suspension sur les régions sahéliennes et soudanaises, est sérieusement remis en question. S'il apparaît que la région de Bilma est plus que certainement une zone source de poussières, il semble que son importance ait été largement surestimée

suite, d'une part, à un concours de circonstances (une courte période d'analyse de quelques années couplée au fait que celle-ci correspond au maximum absolu de la fréquence de lithométéores à Bilma durant la période 1947-1997) et, d'autre part, à la quasi-inexistence des travaux réalisés à ce propos. La fréquence de ces lithométéores semble liée aux déficits pluviométriques enregistrés dans la zone d'étude dès la fin des années soixante. Dans la majeure partie des stations, des maximums de fréquence des lithométéores sont enregistrés au début des années septante et, de manière plus impressionnante, au début des années quatre-vingts avec, souvent, un maximum absolu enregistré durant la saison sèche 1984-85. Cependant, il apparaît que la fréquence des lithométéores a tendance à rester à de très hauts niveaux, voire même à augmenter durant la période « actuelle » (1987-1997).

Nous remettons également en question le paramètre "fréquence des lithométéores" pour la définition des zones sources de poussières. Nous avons montré que la fréquence des cas de déflation semble mieux représenter la réalité des mutations environnementales et géomorphologiques. Cette fréquence présente un accroissement encore plus dramatique que celui observé pour tous les lithométéores (suspension et déflation réunis). Dans toutes les stations, la fréquence des cas de déflation a été multipliée par un facteur variant de cinq à dix. Toutes ces stations sont localisées dans la bande antérieurement sahélienne (durant la période "humide" des années cinquante et soixante) ou actuellement sahélienne. Cette large bande connaît aujourd'hui plus de cas de déflation que les régions désertiques elles-mêmes. Ainsi, la fréquence des cas de déflation est largement supérieure à Agadez et Niamey que celle observée à la station de Bilma.

Du point de vue sédimentaire, on distingue souvent les zones de déflation des zones puits où les sédiments retombent. Au sud du Sahara, les bandes centrale et méridionale du Sahel (sud de 15°N) (CLARK *et al.* 1998) et, surtout, la bande soudanienne sont considérées comme des puits de sédiments éoliens (RAMSPERGER *et al.* 1998). Les vents y sont en effet moins forts, la végétation plus abondante et l'humidité plus élevée.

Ainsi, à Kano (nord du Nigeria), BROMFIELD (1974, *in* MCTAINSH 1980) a observé un taux de sédimentation annuel moyen de  $23 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$  pour la période 1969-1972. A N'Djamena (Tchad), TOBIAS et MEGIE (1980-81) ont estimé le dépôt éolien à  $47 \text{ t km}^{-2}$  pour l'année 1977. Quelques années plus tard, MCTAINSH et WALKER (1982) ont estimé, de 1976 à 1979, des taux de sédimentation de poussières beaucoup plus élevés variant de  $137$  à  $181 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ . Selon ces auteurs, cette augmentation dramatique d'un facteur six à huit était due à la sécheresse persistante aux latitudes septentrionales.

A Dakar, GAC *et al.* (1994) ont déterminé des taux annuels de sédimentation de poussières du même ordre de grandeur variant de 131 à 285 t km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> avec, pour la période 1984-1994, une moyenne de 172 t km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>. Concernant la seule érosion éolienne, MICHELS *et al.* (1993) ont estimé à 1261.5 kg m<sup>-2</sup> la quantité de sable transportée en trois mois durant la fin de la saison sèche – début de la saison des pluies de 1990 aux alentours de Niamey dans un sol sableux destiné à la culture du millet.

Ces recherches focalisées sur les processus, soit de sédimentation des poussières éoliennes, soit de déflation ne donnent malheureusement pas d'indications sur le flux net de particules (sédimentation moins érosion). Peu d'études ont été réalisées à ce sujet. Pourtant, aussi bien l'augmentation des cas de déflation observée dans la zone sahélienne que le déchaussement des arbres isolés observé dans plusieurs régions du Sahel ainsi que d'autres évidences nous amènent à penser que le bilan sédimentaire de ces régions est négatif. Ce n'est que récemment que CHAPPELL (1999) a estimé, après avoir analysé onze sites différents dans la région de Niamey, Niger, que le bilan sédimentaire est négatif de l'ordre de -1400 t km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>. Parmi ces onze sites, trois d'entre eux enregistrent un bilan sédimentaire légèrement positif (maximum +590 t km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>) alors que ce bilan est négatif dans tous les autres sites (maximum -4410 t km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>). Ces informations peuvent être mises en parallèle avec l'évolution très importante des lithométéores observée à Niamey où plus de cas de déflation sont observés que de cas de poussières en suspension susceptibles de se déposer. La réduction de la couverture végétale résultant des activités anthropiques et du changement climatique serait la cause majeure de cette importante érosion éolienne en région sahélienne, autrefois considérée comme zone puits de sédiments éoliens.

D'autre part, et pour aller dans le même sens que CHAPPELL (1999), SALL (1994) a estimé, à partir d'observations géomorphologiques, que la moyenne vallée du fleuve Sénégal et la région du Delta sont rapidement passées d'un bilan sédimentaire éolien fortement positif à négatif dès 1964, à cause – essentiellement – de grands aménagements agricoles, avant de devenir fortement négatif dès les années septante avec les effets de la sécheresse, du surpâturage et de l'abattage d'arbustes ou de grands buissons (MICHEL 1985, 1994). Plus au nord, MAINGUET *et al.* (1999) ont établi, à partir de l'analyse diachronique de photographies aériennes et d'images satellitaires, que les écosystèmes sahéliens de Mreyye / Aouker (Mauritanie méridionale) et de la région de Nouakchott avaient été sévèrement modifiés. Dans les années cinquante, ces régions étaient caractérisées par une zone de dunes transverses semi-fixées par la végétation. Le bilan sédimentaire éolien était alors positif. Dès la moitié

des années soixante (1965) et, donc, avant le début de la grande sécheresse, les processus de déflation ont été de plus en plus fréquents suite aux actions anthropiques. Rapidement, cette région a connu un bilan sédimentaire éolien négatif sans cesse croissant. D'abord qualifiés de préoccupants, les auteurs estiment que les processus d'érosion éolienne sont maintenant irréversibles et que l'ensemble de la Mauritanie est actuellement frappée par les rythmes de dégradation les plus rapides de la planète. La déflation y étant devenue, en quelques dizaines d'années, un phénomène géologique.

Depuis de nombreuses années déjà, les effets anthropiques néfastes du surpâturage, des pratiques agricoles et du déboisement sont mis en cause par une multitude de chercheurs dans les processus de désertification dans les régions arides. Cette dégradation environnementale d'ordre anthropique participe chaque jour à faciliter un peu plus le déclenchement des processus de déflation. De plus, rappelons qu'il n'a pas fallu attendre la grande vague de sécheresse pour pouvoir lire les mises en garde de plusieurs auteurs sur les effets non désirables de l'homme sur son milieu. Ainsi, dans le delta du Sénégal, TRICART (1954, 1961) observait que, dans les conditions naturelles des années cinquante, les actions éoliennes étaient fortement freinées par la couverture végétale. Cependant, il notait déjà, en fin de saison sèche (mai à juillet), le développement particulièrement important des 'actions éoliennes anthropiques'. Notons également que la présence de quelques dunes vives ponctuelles observées le long du fleuve Niger, entre Bourem et Gao, était alors attribuée à la surcharge pastorale (CAPOT-REY 1952).

Si la sécheresse a touché l'intégralité de la région sahélienne, les actions anthropiques ont été plus concentrées, et donc plus néfastes, dans certaines zones. Cela se remarque particulièrement bien dans l'évolution des cas de déflation aux abords des grandes villes comme Niamey dont l'augmentation se démarque sensiblement des autres stations proches.

## 7. Références

- ADETUNJI J., MCGREGOR J. & ONG C.K., 1979. Harmattan haze. *Weather*, 34: 430-436.
- ALPERT P., KAUFMAN Y.J., SHAY-EL Y., TANRE D., DA SILVA A., SCHUBERT S. & JOSEPH J.H., 1998. Quantification of dust-forced heating of the lower troposphere. *Nature*, 395 : 367-370.
- ANDREA M.O., 1996. Raising dust in the greenhouse. *Nature*, 380 : 389-390.
- ANHUF D., GRUNERT J. & KOCH E., 1990. Veränderungen der realen bodendeckung im Sahel der Republik Niger (Regionen Tahoua und Niamey) zwischen 1955 und 1975. *Erdkunde*, 44 : 195-209.

- AUBREVILLE A., 1949. Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Société d'Éditions Géographiques, Maritimes et Coloniales, Paris, 351 p.
- BERTRAND J., CERF A. & DOMERGUE J.L., 1979. Repartition in space and time of dust haze south of the Sahara. In : WMO Symposium on the long-range transport of pollutants and its relation to general circulation including stratospheric/tropospheric exchange processes. WMO N° 538 : 409-415.
- CAPOT-REY R., 1952. Les limites du Sahara français. *Travaux de l'Institut de Recherches Sahariennes*, 8 : 23-48.
- CAPOT-REY R., 1957. Le vent et le modelé éolien au Borkou. *Travaux de l'Institut de Recherches Sahariennes*, 15 : 149-157.
- CHAMARD P.C. & COUREL M.F., 1979. Contribution à l'étude du Sahel voltaïque. Causes et conséquences de la dégradation du couvert végétal des dunes, Secteur de Menegou -Bidi (Département du Sahel – sous-préfecture de l'Oudalan). *Travaux de l'Institut de Géographie de Reims*, 39-40 : 75-90.
- CHAPPELL A., 1999. The limitations of using <sup>137</sup>Cs for estimating soil redistribution in semi-arid environments. *Geomorphology*, 29 : 135-152.
- CLARK I.O., ABDOURAHAMANE K. & BERTRAND J.J., 1998. Caractérisation des zones potentielles de déflation dans onze stations en Afrique au sud du Sahara. *Sécheresse*, 8 : 227-239.
- COUDE-GAUSSIN G. & ROGNON P., 1983. Les poussières sahariennes. *La Recherche*, 147 : 1050-1061.
- COUDE-GAUSSIN G., 1991. Les poussières sahariennes. Cycle sédimentaire et place dans les environnements et paléoenvironnements désertiques. John Libbey Eurotext, Paris, 485 p.
- DRESCH J. & ROUGERIE G., 1960. Observations morphologiques dans le Sahel du Niger. *Revue de Géomorphologie dynamique*, 11 : 49-58.
- DUBIEF J., 1943. Les vents de sable dans le Sahara français. *Travaux de l'Institut de Recherches Sahariennes*, 2 : 11-35.
- DUBIEF J., 1952. Le vent et le déplacement du sable au Sahara. *Travaux de l'Institut de Recherches Sahariennes*, 8 : 123-162.
- GAC J.Y., CARN M. & COGELS F.X., 1994. Les brumes sèches : Événements climatiques majeurs au Sahel. Gros plan sur les observations journalières au Sénégal de 1984 à 1993. In : Satellite et surveillance du climat – Atlas de Veille Climatique : 1986-1994 (Afrique et Atlantique intertropical). LAHUEC J.P. & GUILLOT B. eds., ORSTOM : 80-83.
- GOUDIE A.S. & MIDDLETON N.J., 1992. The changing frequency of dust storms through time. *Climatic Change*, 20 : 197-225.
- GOUDIE A.S., 1978. Dust storms and their geomorphological implications. *Journal of Arid Environments*, 1 : 291-310.
- GOUDIE A.S., 1996. Climate : Past and present. In : The physical Geography of Africa. ADAMS W.M., GOUDIE A.S. & ORME A.R. eds., Oxford University Press, New York : 34-59.
- GROVE A.T., 1958. The ancient erg of Hausaland and similar formations on the south side of the Sahara. *The Geographical Journal*, 124 : 526-533.
- 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 : Saharan dust : Mobilization, transport, deposition. MORALES D. ed., Wiley, New York, 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, Faculté des Sciences, Université de Liège. 350 p.
- KUBEROW H., 1990. Anwendung von LANDSAT-Daten zur Erfassung der Vegetationsdynamik in desertifikationsgefährdeten Gebieten Malis. *Die Erde*, 121 : 39-53.
- LANCASTER N., 1996A. Desert environments. In : The physical Geography of Africa. ADAMS W.M., GOUDIE A.S. & ORME A.R. eds., Oxford University Press, New York : 211-237.
- LANCASTER N., 1996B. Editorial: Response of aeolian processes to global climate change. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21 : 587.
- LEINEN M. & SARNTHEIN M., 1989. Paleoclimatology and paleometeorology : modern and past patterns of global atmospheric transport. Kluwer Academic Publishers, NATO ASI Series, Serie C282. 909 p.
- LEROUX M., 1983. Le climat de l'Afrique tropicale. Editions CHAMPION, Paris. 633 p. + Atlas (24 p. + 250 planches).
- LI X., MARING H., SAVOIE D., VOSS K. & PROSPERO J.M., 1996. Dominance of mineral dust in aerosol light scattering in the North Atlantic trade winds. *Nature*, 380 : 416-419.
- LINDQVIST S. & TENGBERG A., 1994. New evidence of Desertification from case studies in Northern Burkina Faso. *Desertification Control Bulletin*, 25 : 54-60.
- MAINGUET M., 1977. Analyse quantitative de l'extrémité sahélienne du courant éolien transporteur de sable au Sahara nigérien. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 285 : 1029-1032.
- 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.
- MAINGUET M., DUMAY F., OULD EL HACEN M.L. & MAHFOUDH A., 1999. Diagnostic par la télédétection d'un changement de rythme de la dynamique éolienne en Mauritanie: La désertification accélérée. Article présenté aux VIII<sup>es</sup> Journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUF, 22-25 novembre 1999.
- MCTAINSH G., 1980. Harmattan dust deposition in northern Nigeria. *Nature*, 286 : 587-588.
- MCTAINSH G.H. & WALKER P.H., 1982. Nature and distribution of Harmattan dust. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 26 : 417-435.
- MICHEL P., 1985. Sécheresse et transformation de la morphodynamique dans la vallée et le delta du Sénégal. *Revue de Géomorphologie Dynamique*, 34 : 113-130.
- MICHEL P., 1994. Avant-Propos. In : L'après-barrages dans la vallée du Sénégal – Modifications hydro-dynamiques et sédimentologiques. Conséquences sur le milieu et les aménagements hydro-agricoles. MICHEL P., BARUSSEAU J.P., RICHARD J.F. & SALL M. eds. Presses Universitaires de Perpignan, Collection Etudes: 1-4.
- MICHELS K., SIVAKUMAR M.V.K. & ALLISON B.E., 1993. Wind erosion in the Southern Sahelian Zone and induced constraints to pearl millet production. *Agricultural and Forest Meteorology*, 67 : 65-77.
- MIDDLETON N.J., 1985. Effect of drought on dust production in the Sahel. *Nature*, 316 : 431-434.

- MIDDLETON N.J., 1989. Climatic controls on the frequency, magnitude and distribution of dust storms : example from India/Pakistan, Mauritania and Mongolia. *In* : Paleoclimatology and paleometeorology : modern and past patterns of global atmospheric transport. LEINEN M. & SARNSTEIN M. eds. Kluwer Academic Publishers, NATO ASI Series, Serie C282 : 97-132.
- MORAL P., 1965. Le climat du Sénégal (I). *Revue de Géographie de l'Afrique Occidentale*, 1-2 : 49-70.
- MORALES D., 1979. Saharan dust : Mobilization, transport, deposition. Wiley, New York, Scope 14, 289 p.
- N'DJAFIA OUAGA H. & COUREL M.F., 2000. Utilisation de l'imagerie aérienne et satellitale pour l'analyse de la mutation des espaces ruraux : cas de la sous-préfecture de Mandéla dans le département de Hadjer Lamis au Tchad. *in* : La télédétection en francophonie : Analyse critique et perspectives. DUBOIS J.M.M., CALOZ R. & GAGNON P. eds., AUPELF-UREF, 177-185.
- N'TCHAYI MBOUROU G., BERTRAND J.J., & NICHOLSON S., 1997. The diurnal and seasonal cycles of wind-borne dust over Africa north of the equator. *Journal of Applied Meteorology*, 36 : 868-882.
- NASH D.J., 1999. Arid geomorphology. *Progress in Physical Geography*, 23 : 429-439.
- NOUACEUR Z., 1994. Les variations spatio-temporelles et les causes de mauvaise visibilité en Mauritanie. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 7 : 477-484.
- NOUACEUR Z., 1999. Evolution récente des lithométéores en Mauritanie. Thèse de doctorat, Université Jean Moulin Lyon III, Laboratoire de Géographie Physique. 503 p.
- O.M.M., 1992. Vocabulaire Météorologique International. No. 182, 784 p.
- 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, Faculté des Sciences, Université de Liège. 177 p.
- OZER P., 1998. Lithometeors and wind velocity in relation with desertification during the dry season from 1951 to 1994 in Niger. *In* : Tropical Climatology, Meteorology and Hydrology. DEMAREE G., ALEXANDRE J. & DE DAPPER M. eds. Royal Meteorological Institute of Belgium / Royal Academy of Overseas Sciences, 212-227.
- OZER P., 2000. Les lithométéores en région sahélienne : un indicateur climatique de la désertification. Thèse de doctorat, Université de Liège, Faculté des Sciences, Liège, Belgique. 312 p.
- PARE L. & TALLET B., 1999. D'un espace ouvert à un espace saturé : Dynamique foncière et démographique dans le département de Kouka (Burkina Faso). *Espace, Populations, Sociétés*, 37 : 83-92.
- PETTITT A.N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 28 : 126-135.
- PÉWÉ T.L., 1981. Desert dust : Origin, characteristics, and effect on man. *Geological Society of America, Special Paper* 186. 303 p.
- PYE K., 1987. Aeolian dust and dust deposits. Academic Press, London, 334 p.
- RAMSPERGER B., HERRMANN L. & STAHR K., 1998. Dust characteristics and source-sink relations in eastern West-Africa (SW-Niger and Benin) and South America (Argentinean Pampas). *Zeitschrift für Pflanzenenernähr und Bodenkunde*, 161 : 357-363.
- SALL M., 1994. La dynamique éolienne. *In* : L'après-barrages dans la vallée du Sénégal - Modifications hydro-dynamiques et sédimentologiques. Conséquences sur le milieu et les aménagements hydro-agricoles. MICHEL P., BARUSSEAU J.P., RICHARD J.F. & SALL M. eds. Presses Universitaires de Perpignan, Collection Etudes : 9-18.
- SCHLESINGER W.H., REYNOLDS J.F., CUNNINGHAM G.L., HUENNEKE L.F., JARRELL W.M., VIRGINIA R.A. & WHITFORD W.G., 1990. Biological feedbacks in global desertification. *Science*, 247 : 1043-1048.
- STEBBING E.P., 1935. The encroaching Sahara : the threat of the West African Colonies. *The Geographical Journal*, 85 : 506-524.
- STENDEL I., 1992. Morphodynamic types of longitudinal dunes in the Ténéré desert and the Erg of Bilma (Republic of Niger). *Würzburger Geographische Arbeiten*, 84 : 147-168.
- TEGEN I. & FUNG I., 1994. Modeling of mineral dust in the atmosphere : Sources, transport, and optical thickness. *Journal of Geophysical Research*, 99 : 22897-22914.
- TEGEN I. & FUNG I., 1995. Contribution to the atmospheric mineral aerosol load from land surface modification. *Journal of Geophysical Research*, 100 : 18707-18726.
- TEGEN I., LACIS A.A. & FUNG I., 1996. The influence of mineral aerosols from disturbed soils on the global radiation budget. *Nature*, 380 : 419-422.
- TOBIAS C. & MEGIE C., 1980-1981. Les lithométéores au Tchad. Premiers résultats concernant la nature, la composition et l'importance des aérosols transportés par voie atmosphérique dans la région de N'Djamena (Tchad). *Cahiers ORSTOM, Série Pédologique*, XVIII : 71-81.
- TRICART J., 1954. Influence des sols salés sur la déflation éolienne en basse Mauritanie et dans le delta du Sénégal. *Revue de Géomorphologie Dynamique*, 5 : 124-132.
- TRICART J., 1959. Géomorphologie dynamique de la moyenne vallée du Niger (Soudan). *Annales de Géographie*, 368 : 333-343.
- TRICART J., 1961. Notice explicative de la carte géomorphologique du delta du Sénégal. *Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières*, 8 : 1-137.
- WICKENS G.E., 1997. Has the Sahel a future ? *Journal of Arid Environments*, 37 : 649-663.
- 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.

Pierre OZER  
 Fondation Universitaire Luxembourgeoise  
 Avenue de Longwy, 185  
 B-6700 Arlon - Belgique  
 ozer@ful.ac.be