

UTILISATION DE LA VISIBILITÉ HORIZONTALE POUR L'ESTIMATION DE LA QUALITÉ DE L'AIR À NIAMEY (NIGER)

Pierre OZER

Résumé

Il est actuellement incontestable que la pollution de l'air causée par l'augmentation de la concentration en particules solides a un grand nombre de conséquences néfastes sur la santé humaine. La détérioration de la qualité de l'air causée ponctuellement par la forte concentration en poussières minérales africaines inquiète différents pays occidentaux pourtant très distants du Sahara. Actuellement, aucune étude sur les niveaux de concentration en particules solides dans l'air dans les régions limitrophes du Sahara n'a été réalisée. Sur base des mesures de visibilité horizontale réduite par les lithométéores, les niveaux de concentration en particules solides sont estimés au niveau de la station synoptique de Niamey-Aéroport (Niger) en utilisant différentes relations disponibles dans la littérature. Il apparaît que les concentrations en poussières minérales sont très importantes tant du point de vue de leur magnitude que de leur fréquence. Ces fortes concentrations en poussières éoliennes dans l'air posent un réel problème de santé publique qui devrait retenir l'attention des décideurs politiques nationaux et internationaux.

Mots-clés

Qualité de l'air, particules solides dans l'air (TSP), lithométéores, Sahel

Abstract

It is now irrefutable that air pollution caused by large amounts of Total Suspended Particulates (TSP) has numerous undesired consequences on human health. Air quality deterioration in the US and in Europe caused by high concentration of African dust is seen as a major health threat although most of these countries are very distant from the Sahara. Surprisingly, no estimates of TSP levels near the Saharan dust source are available. Based on horizontal visibility measurements reduced by dust in the air, TSP levels are estimated at Niamey-Aéroport (Niger) by using different relations found in the literature. It appears that excessive TSP concentration levels are very important in magnitude and frequency. These very high TSP levels represent a tremendous public health threat that should be absolutely taken into consideration by national and international decision makers.

Keywords

Air quality, Total Suspended Particulates (TSP), dust processes, Sahel

INTRODUCTION

Les régions arides et semi-arides de l'Afrique septentrionale et occidentale contribuent largement à l'injection globale de poussières minérales dans l'hémisphère nord (Prospero *et al.*, 2002; Washington *et al.*, 2003). Il est estimé que le Sahara et ses marges injectent des quantités de poussières dans l'atmosphère variant entre 600 et 900 10⁶ tonnes par an (D'Almeida, 1986; Marticorena *et al.*, 1997; Callot *et al.*, 2000). Ceci représenterait approximativement la moitié de la production mondiale de poussières minérales (Goudie, 1996).

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 (Tegen et Fung, 1995; Lancaster, 1996; Hulme *et al.*, 2001; Nicholson, 2001; Ozer, 2002). 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. À titre d'exemple, nous citerons les

récents travaux réalisés dans les îles Canaries (Viana *et al.*, 2002), en Espagne (Rodriguez *et al.*, 2001, 2003), en Grande-Bretagne (Ryall *et al.*, 2002), au Moyen-Orient (Alpert et Ganor, 2001) ou encore dans le sud-est des États-Unis (Prospero, 1999). Cette pollution de l'air par une importante concentration en particules solides promeut les infections respiratoires, les maladies cardiovasculaires et une multitude d'autres troubles de la santé (WHO, 2000; Griffin *et al.*, 2001b; Cyranoski, 2003; Wiggs *et al.*, 2003). De plus, les poussières minérales ainsi emportées par le vent peuvent transporter des bactéries et des spores (Griffin *et al.*, 2001a), sont parfois contaminées par des pesticides (O'Hara *et al.*, 2000), voire même radioactives (Papastefanou *et al.*, 2001).

Étonnamment, et malgré tous les effets indésirables de ces poussières sur la santé humaine, nul n'a idée des niveaux de concentration en particules solides dans l'air (TSP, *Total Suspended Particulates*) 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).

Sur base des mesures de visibilité horizontale réduite par les poussières minérales dans l'air, cet article estime les niveaux de concentration en particules solides au niveau de la station synoptique de Niamey-Aéroport (Niger) en utilisant différentes relations disponibles dans la

littérature. Pour des raisons de disponibilité des données, l'étude se limite à l'analyse de la saison sèche (novembre à mars), aussi appelée saison de l'Harmattan, durant cinq années consécutives (1991-92 à 1995-96). La région de Niamey se situe directement sous le vent de la dépression du Bodélé (Fig. 1) 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 à basse altitude vers le sud du Niger et le Nigeria avant d'atteindre le Golfe de Guinée (Kalu, 1979; Bertrand *et al.*, 1979; Afeti et Resch, 2000; Middleton et Goudie, 2001).

I. 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 Niamey-Aéroport est l'une des rares stations de premier ordre en Afrique de l'Ouest. Dix-huit points de repère sont répartis dans toutes les directions, ce qui limite fortement la marge d'erreur potentielle de l'estimation de la visibilité horizontale. Certes, une erreur minime persiste lors de l'estimation

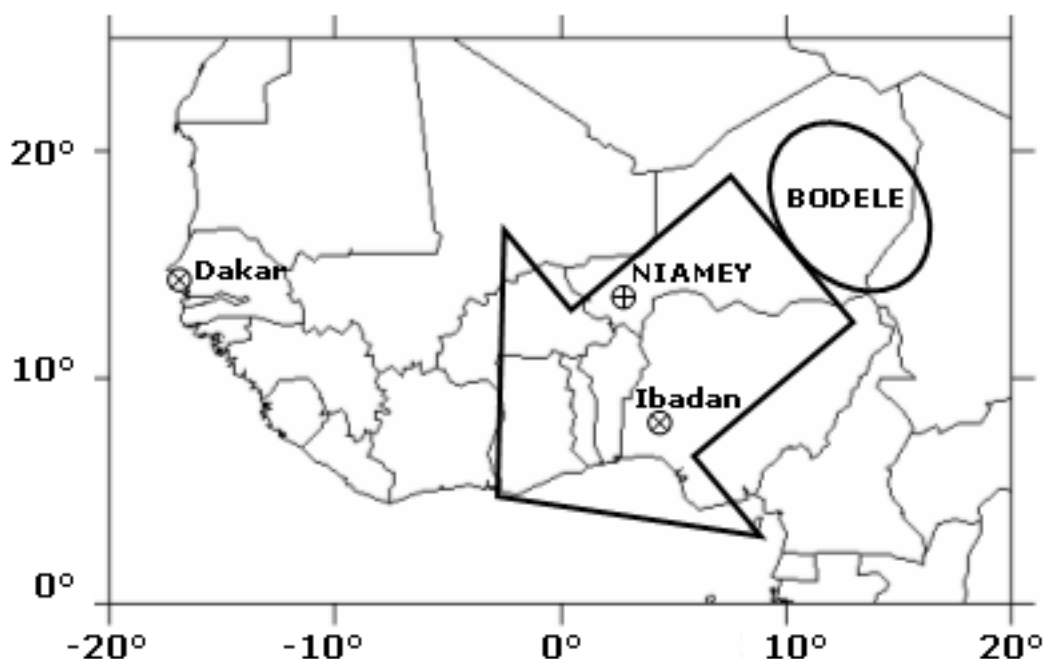


Figure 1. Localisation de la dépression fermée du Bodélé et de Niamey, ainsi que de Dakar et Ibadan. La flèche indique la direction habituelle du transport des poussières minérales

de la visibilité horizontale proprement dite. Ainsi, lorsque l'observateur est en mesure d'identifier une cible située à six kilomètres alors que le point de repère situé à sept kilomètres est masqué par la présence de poussière, la visibilité horizontale reportée sera de six 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; Ericum et Ozer, 1999; Ozer, 2000). Les données utilisées couvrent la saison sèche (novembre à mars) influencée par l'Harmattan et durant laquelle toutes les visibilités ne sont réduites que 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 dix kilomètres sont considérées dans cette étude. Pour de plus grandes valeurs, l'air est supposé « pur ».

Niamey, à l'instar des autres villes du Tiers-Monde, connaît une expansion exponentielle de sa population. De ce fait, la capitale du Niger doit faire face, en outre, à d'importants problèmes de pollution de l'air dus principalement à l'augmentation incontrôlée du trafic de vieux véhicules ne répondant à aucune norme antipollution ainsi qu'à l'usage très répandu du bois ou du charbon de bois pour la cuisson des aliments et à la destruction des déchets par le feu. Cependant, les données utilisées dans

cet article proviennent de l'aéroport, situé à une dizaine de kilomètres de la périphérie de Niamey, et ne semblent pas être influencées par des émissions anthropiques qui pourraient affecter la visibilité. En effet, le code synoptique (04) attribué aux fumées d'origine exclusivement anthropique limitant la visibilité horizontale à moins de dix kilomètres n'est jamais répertorié à Niamey durant la période d'analyse. En outre, l'entraînement local de poussières provoqué par les mouvements du cheptel est fortement limité étant donné que l'aéroport est protégé par des clôtures. Dès lors, toutes les estimations des niveaux de concentration en particules solides présentées dans cet article représentent en réalité la pollution atmosphérique naturelle ambiante provoquée par le transport de poussières minérales.

Quelques études sur la relation entre visibilité horizontale et concentration en TSP ont été menées en Afrique de l'Ouest (Tab. 1). Bertrand (1976) a étudié cette relation en se basant sur trois années de données (1973 à 1975) durant la saison de l'Harmattan à Niamey (Eq. 1). Les visibilités horizontales utilisées pour établir cette relation s'étalent de 1,5 à 12 kilomètres. Ette et Olorode (1988) ont pour leur part utilisé des données récoltées à Ibadan (Nigeria) durant les mois de janvier et février 1979 (Eq. 2). Les auteurs se basent sur des visibilités horizontales variant entre 3 et 20 kilomètres pour établir leur relation. Bayoko et Fongang (1990) ont mis en relation visibilité horizontale et concentration en TSP sur base des données recueillies à Dakar, Sénégal, durant 1989 (Eq. 3); l'échantillon de visibilités horizontales s'étale de 300 mètres à 20 kilomètres. Ben Mohamed et son équipe (1992) ont utilisé les données de sept stations synoptiques au Niger durant 17 mois (Eq. 4). Ces auteurs considèrent tout le spectre des visibilités horizontales, à savoir de 100 mètres à 20 kilomètres. La figure 2 montre la relation entre visibilité horizontale (km) et concentration en TSP ($\mu\text{g m}^{-3}$) selon les quatre équations présentées au tableau 1.

Relation		Localisation	Auteurs
$C = 1897 \text{ VV}^{-0,91}$	(1)	Niamey (Niger)	Bertrand, 1976
$C = 1600 \text{ VV}^{-0,62}$	(2)	Ibadan (Nigeria)	Ette et Olorode, 1988
$C = 1500 \text{ VV}^{-1}$	(3)	Dakar (Sénégal)	Bayoko et Fongang, 1990
$C = 1339.84 \text{ VV}^{-0,67}$	(4)	7 stations (Niger)	Ben Mohamed <i>et al.</i> , 1992

Tableau 1. Relation entre la visibilité horizontale (VV en km) et la concentration en TSP (C en $\mu\text{g m}^{-3}$)

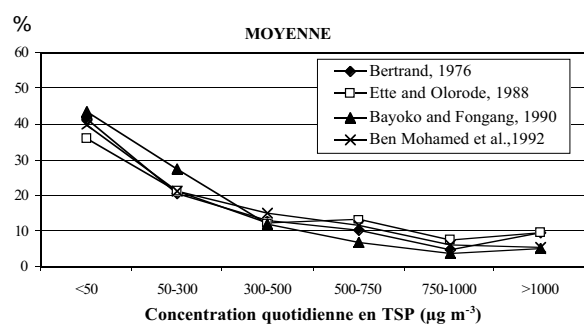


Figure 2. Relation entre la visibilité horizontale (km) et la concentration en TSP ($\mu\text{g m}^{-3}$) selon les quatre équations présentées au tableau 1

Pour une visibilité donnée, les concentrations estimées en TSP montrent une grande variabilité. Ainsi, celles-ci varient entre 500 et 810 $\mu\text{g m}^{-3}$ pour une visibilité horizontale réduite à 3 kilomètres. De telles variations peuvent être expliquées par les différentes méthodes d'échantillonnage des concentrations en TSP et le nombre de données utilisées pour établir les relations. Rares sont les études ponctuelles permettant de faire une comparaison entre les mesures de visibilité horizontale et les concentrations en TSP. Au Mali, Gillies *et al.* (1996) ont observé une concentration journalière en TSP 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 al.* (2003b) ont analysé les invasions de lithométéores originaires de Chine et ont trouvé des concentrations moyennes en TSP 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 les quatre relations présentées précédemment et utilisées par la suite.

Les quatre relations (Eq. 1 à 4, Tab. 1) sont appliquées aux données de visibilité horizontale de la station synoptique de Niamey-Aéroport dans le but d'obtenir une estimation de la concentration en TSP. Les résultats ainsi obtenus sont présentés aux pas de temps quotidien, et saisonnier (saison sèche). La concentration moyenne annuelle en TSP est ensuite estimée en fonction de la répartition des lithométéores au Sahel durant les années considérées. Ces informations sont ensuite comparées à quelques normes de qualité de l'air.

II. RÉSULTATS ET DISCUSSION

A. Concentration journalière en TSP

Durant ces deux dernières décennies, la concentration en TSP 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 TSP 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 TSP à la station de Niamey-Aéroport ont été obtenues en moyennant les huit données tri-horaires disponibles quotidiennement. La figure 3 présente la distribution de la fréquence des concentrations journalières en TSP durant les cinq saisons sèches analysées ainsi qu'en moyenne. Il apparaît que 40% des jours analysés présentent une qualité de l'air excellente (TSP < 50 $\mu\text{g m}^{-3} \text{ j}^{-1}$). Cependant, des niveaux de concentration en TSP préoccupants (> 300 $\mu\text{g m}^{-3} \text{ j}^{-1}$) s'observent en moyenne dans 37% des cas, soit 56 jours par saison sèche (minimum 43 jours à maximum 64 jours selon les équations utilisées ; ci-après présenté comme suit [43-64]). Ce nombre de dépassements du seuil critique est extrêmement important, trois fois le maximum toléré en Espagne, dans la mesure où seulement cinq mois de l'année sont considérés. Par ailleurs, la figure 3 révèle également l'extrême variabilité inter annuelle de la fréquence des jours présentant des niveaux de concentration en TSP supérieurs à 300 $\mu\text{g m}^{-3}$ qui peut varier du simple (24% en 1995-96) au double (48% en 1993-94). Il en va de même pour la fréquence des jours présentant une qualité de l'air excellente (TSP < 50 $\mu\text{g m}^{-3}$) qui oscille entre 21% en 1993-94 et 55% en 1995-96. Il est bon de garder à l'esprit que les valeurs moyennes présentées ci-dessus doivent donc être prises comme une indication de la pollution de l'air par les particules, au même titre que des moyennes climatiques calculées sur de plus longues périodes encore.

Au fil des années, les pays développés ont fixé des normes de qualité de l'air relatives aux concentrations journalières en PM_{10} , à savoir la partie des TSP dont la taille est inférieure à 10 μm . En effet, ces particules sont inhalées et sont cause de morbidité et mortalité. Ainsi, la concentration en PM_{10} est associée aux admissions des personnes âgées dans les hôpitaux pour des problèmes cardio-vasculaires et pulmonaires, augmentant respectivement de 1% et 2%, à chaque accroissement de 10 $\mu\text{g m}^{-3}$ en PM_{10} (Samet *et al.*, 2000). Globalement, il est estimé que chaque accroissement de 10 $\mu\text{g m}^{-3}$ en PM_{10} est en moyenne associé à une augmentation de 0,7% du nombre de décès dus à des troubles respiratoires (WHO, 2000) et de 0,34% à 0,5% de la mortalité non accidentelle totale (Samet *et al.*, 2000; Dominici *et al.*, 2000). 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).

Grâce à de récentes études menées aux Iles Canaries (Viana *et al.*, 2002) et en Corée (Chung *et al.*, 2003a), il nous est possible d'estimer la concentration en PM_{10} à partir des TSP. En effet, ces deux études indépendantes

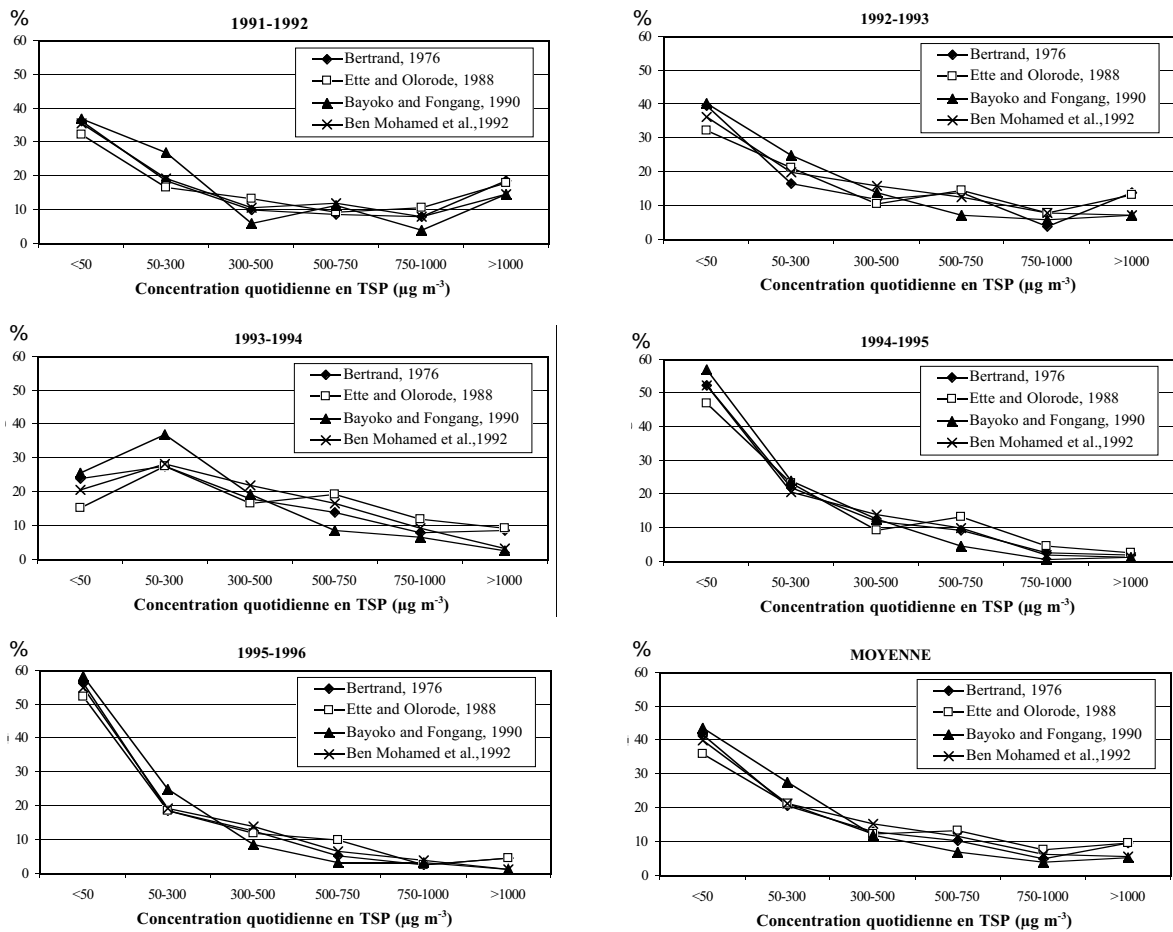


Figure 3. Distribution de la fréquence des concentrations journalières en TSP à la station de Niamey-Aéroport durant les cinq saisons sèches analysées et en moyenne selon les quatre équations présentées au tableau 1

ont déterminé que la fraction des PM_{10} constituait approximativement 70% des TSP au sein des nuages de poussières transportés sur de longues distances. Étant donné que la majeure partie des lithométéores observés dans la région de Niamey proviennent de la dépression du Bodélé (Fig. 1) après avoir été transportées sur plus de mille kilomètres (Goudie et Middleton, 2001; Prospero *et al.*, 2002; Washington *et al.*, 2003), les données de concentrations journalières en TSP ont ainsi été transformées pour obtenir une estimation de la concentration en PM_{10} dans l'air (Fig. 4). Ci-après, nous présentons une discussion relative à ces niveaux de pollution de l'air par rapport aux législations en vigueur aux États-Unis et à venir en Europe.

Aux États-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). La concentration journalière limite en PM_{10} définie par l'Agence de Protection Environnementale américaine est de $150 \mu g m^{-3}$. L'application de ce seuil à Nia-

mey-Aéroport montre que, durant la saison sèche, 44% des jours analysés dépassent cette limite (Fig. 4). En moyenne, la qualité de l'air serait très malsaine, médiocre et dangereuse dans respectivement 2%, $5 \pm 1\%$ et $14 \pm 4\%$ des cas. Ceci revient à dire qu'une qualité de l'air dangereuse ($PM_{10} > 500 \mu g m^{-3} j^{-1}$), associée à la mort prématurée chez certaines catégories de personnes (vulnérables par rapport aux maladies respiratoires et cardiaques), s'observe en moyenne 22 [15-28] jours par saison sèche.

En Europe, la Commission Européenne a récemment établi certains seuils très sévères de concentration en PM_{10} 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 PM_{10} de $50 \mu g m^{-3}$ ne pourra être dépassée que 35 jours par an en janvier 2005 et 7 jours par an en janvier 2010. Il appert que dans 57% des cas, soit 86 [80-88] jours pour la seule saison sèche, cette limite de $50 \mu g m^{-3}$ est dépassée à Niamey-Aéroport (Fig. 3), douze fois la fréquence maximale qui sera tolérée dans l'Union Européenne en 2010.

Niveau de pollution en PM ₁₀ (concentration en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{j}^{-1}$)	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)

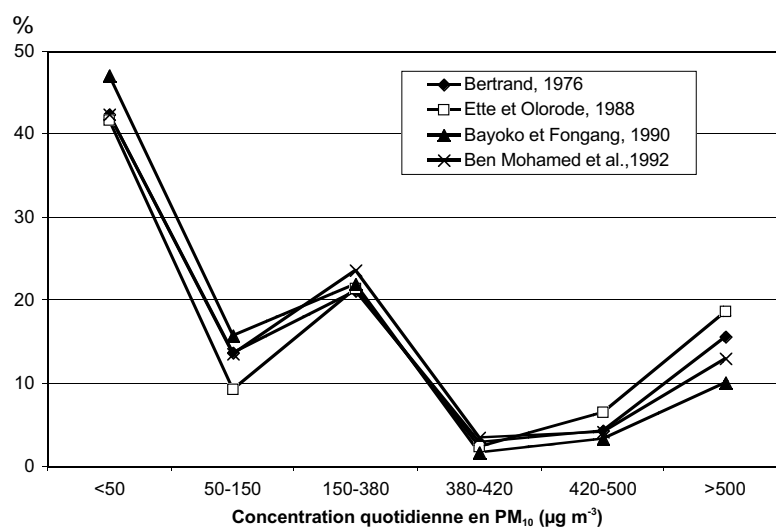


Figure 4. Distribution de la fréquence des concentrations journalières en PM₁₀ à la station de Niamey-Aéroport en fonction de différents seuils de qualité de l'air (voir Tab. 2)

	Concentration en TSP ($\mu\text{g m}^{-3}$)				
	Eq. 1	Eq. 2	Eq. 3	Eq. 4	Moyenne
1991-1992	512	496	391	404	451
1992-1993	430	430	327	348	384
1993-1994	383	437	278	346	361
1994-1995	190	221	136	175	180
1995-1996	220	228	169	183	200
Moyenne saison sèche	347	362	260	291	315
Estimation annuelle	268	280	200	225	243

Tableau 3. Concentration moyenne en TSP ($\mu\text{g m}^{-3}$) durant la saison sèche et estimation annuelle à la station de Niamey-Aéroport (Niger)

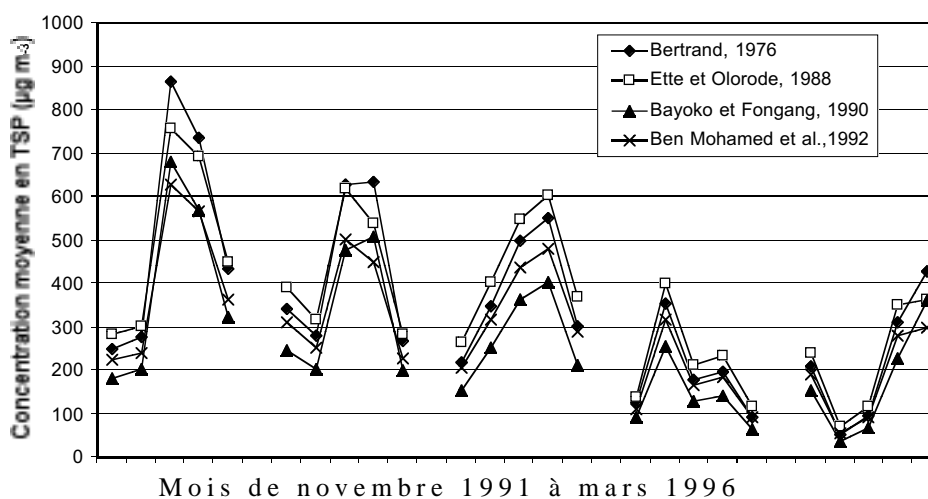


Figure 5. Concentration en TSP ($\mu\text{g m}^{-3}$) à la station de Niamey-Aéroport durant les mois de novembre à mars de 1991-1992 à 1995-1996 selon les quatre équations présentées au tableau 1

L'application de ces différentes directives sur la qualité de l'air aux valeurs estimées à Niamey-Aéroport 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 saisonnière et annuelle en TSP

Les valeurs de concentration en TSP obtenues à Niamey-Aéroport pour les saisons sèches 1991-92 à 1995-96 sont présentées à la figure 5 et au tableau 3. De novembre à mars, les concentrations moyennes en TSP varient de 180 [136-221] à 451 [391-512] $\mu\text{g m}^{-3}$, respectivement en 1994-95 et 1991-92. De telles variations

sont typiques de la fréquence des lithométéores qui est contrôlée par une série de facteurs environnementaux parmi lesquels la pluviométrie moyenne annuelle, les fluctuations pluviométriques, le type et le degré de couverture végétale, les propriétés physiques du sol, et la vitesse du vent (N'Tchayi Mbourou *et al.*, 1997; Ozer, 2000; Goudie et Middleton, 2001; Engelstaedter *et al.*, 2003). Par exemple, 1994 fut l'année la plus pluvieuse enregistrée au Sahel depuis la fin des années soixante (Nicholson *et al.*, 1996). Cette importante pluviométrie s'est traduite par une couverture végétale plus dense et plus étendue vers le nord en comparaison avec les années précédentes (Tucker et Nicholson, 1999). En définitive, la fréquence des lithométéores a été clairement moindre durant la saison sèche suivante (1994-95).

En moyenne, la concentration en TSP obtenue à Niamey-Aéroport par saison sèche est de 315 [260-362] $\mu\text{g m}^{-3}$. Sachant que le nombre de jours affectés par les lithométéores de novembre à mars compte pour 54% de

la fréquence annuelle (Ozer, 2000), la concentration annuelle en TSP est calculée comme suit : $C_A = C_{SS} \times NJ_{SS} \times PL_{SS} / 365$; où C_A est la concentration annuelle en TSP, C_{SS} est la concentration en TSP par saison sèche, NJ_{SS} est le nombre de jours considérés pour la saison sèche (151) et PL_{SS} représente le pourcentage des lithométéores observés en saison sèche par rapport au total annuel (54%).

La concentration annuelle en TSP peut donc être estimée à 241 [200-277] $\mu\text{g m}^{-3}$. Cette valeur est à nouveau très importante puisqu'elle est trois 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 également près de deux fois plus élevée que la concentration annuelle en TSP 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).

En appliquant le taux de conversion cité auparavant nous permettant d'obtenir la concentration en PM_{10} à partir des TSP, nous obtenons une concentration annuelle en PM_{10} estimée à 169 [140-194] $\mu\text{g m}^{-3}$. Des valeurs du même ordre de grandeur (112 à 255 $\mu\text{g m}^{-3}$) ont été estimées aux abords de la Mer d'Aral (Wiggs *et al.*, 2003). 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 Niamey-Aéroport présente donc des valeurs trois à quatre fois supérieures aux normes en vigueur dans les pays développés.

Comparée aux valeurs disponibles ailleurs dans le monde (Baldasano *et al.*, 2003), la concentration annuelle en TSP estimée à Niamey-Aéroport n'est dépassée que dans certains pays asiatiques caractérisés par la présence d'une industrie lourde très polluante que sont la Chine, l'Inde et l'Indonésie, ainsi qu'à Mexico. Il est à noter que ces concentrations sont enregistrées dans les villes dont la population est supérieure à 3 millions d'habitants. Ailleurs, les concentrations annuelles en TSP excédant 200 $\mu\text{g m}^{-3}$ sont rares. En ce qui concerne la comparaison avec les concentrations annuelles en PM_{10} , aucune valeur ne dépasse 150 $\mu\text{g m}^{-3}$, mais ces données ne sont encore disponibles que pour le monde occidental.

III. CONCLUSIONS

Les résultats présentés dans cet article donnent une première estimation de l'impact des poussières minérales provenant de l'érosion éolienne sur la qualité de l'air au Sahel. Une concentration moyenne annuelle en TSP de 200 à 277 $\mu\text{g m}^{-3}$ selon les relations utilisées, soit trois fois la valeur maximale préconisée par l'Organisation

Mondiale de la Santé, est extrêmement importante dès lors que seule l'exposition aux poussières naturelles est prise en compte. À cette concentration de base doivent s'ajouter toutes les émissions anthropiques si l'on considère la pollution de l'air dans les zones urbaines très densément peuplées et très pauvres d'Afrique sahélienne.

Il est également suggéré que les quatre relations estimant la concentration en TSP en fonction de la visibilité horizontale sont cohérentes et confirment les rares informations disponibles dans la littérature. L'analyse des données de visibilité horizontale provenant d'autres régions arides et semi-arides de la planète pourrait ainsi nous permettre de délimiter les zones soumises à ce type de pollution naturelle de l'air néfaste à la santé humaine.

Les pays occidentaux sont de plus en plus stricts quant à la qualité de l'air et d'énormes efforts financiers sont consentis pour diminuer la pollution atmosphérique. Par contre, les pays moins favorisés, car les pays de la bande sahélienne comptent parmi les plus pauvres de la planète avec des taux de mortalité infantile pouvant atteindre 27%, en partie à cause de maladies respiratoires (Black *et al.*, 2003), ne disposent pas de réglementation relative à la qualité de l'air, ni même des appareils pour en assurer le suivi. Dans ces conditions, les relations entre la fréquence des maladies respiratoires et l'estimation de la pollution de l'air dérivée des visibilités horizontales devraient être explorées dans des recherches à venir.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier vivement le Dr. A. Demoulin de l'Université de Liège ainsi qu'un relecteur anonyme du manuscrit pour leurs conseils judicieux qui ont permis d'améliorer la qualité de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- AFETI G.M. et RESCH F.J., 2000. Physical characteristics of Saharan dust near the Gulf of Guinea. *Atmospheric Environment*, 34, 1273-1279.
- ALPERT P. et 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.
- ARTIÑANO B., QUEROL X., SALVADOR P., RODRÍGUEZ S., ALONSO D.G. et ALASTUEY A., 2001. Assessment of airborne particulate levels in Spain in relation to the new EU-directive. *Atmospheric Environment*, 36, Supplement 1, 43-53.
- BALDASANO J.M., VALERA E. et JIMÉNEZ P., 2003. Air quality data from large cities. *The Science of the Total Environment*, 307, 141-165.
- BAYOKO A. et FONGANG S., 1990. Analyse d'une situation de poussières en zone côtière sénégal-mauritanienne. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 3, 103-113.

- BEN MOHAMED A., FRANGI J.P., FONTAN J. et DRUILHET A., 1992. Spatial and temporal variations of atmospheric turbidity and related parameters in Niger. *Journal of Applied Meteorology*, 31, 1286-1294.
- BERTRAND J., 1976. Visibilité et brume sèche en Afrique. *La météorologie*, VI, 6, 201-211.
- BERTRAND J., CERF A. et 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*, pp. 409-415, WMO, Geneva, N°538.
- BLACK R.E., MORRIS S.S. et BRYCE J., 2003. Where and why are 10 million children dying every year ?. *Lancet*, 361, 2226-2234.
- BOUBEL R. W., FOX D.L., TURNER D.B. et STERN A.C., 1994. *Fundamentals of air pollution*, Academic Press, 574 p.
- CALLOT Y., MARTICORENA B. et BERGAMETTI G., 2000. Geomorphologic approach for modelling the surface features of arid environments in a model of dust emissions: applications to the Sahara desert. *Geodinamica Acta*, 13, 245-270.
- CHUNG Y.S., KIM H.S., DULAM J. et HARRIS J., 2003a. On heavy dustfall observed with explosive sandstorms in Chongwon-Chongju, Korea in 2002. *Atmospheric Environment*, 37, 3425-3433.
- CHUNG Y.S., KIM H.S., PARK K.H., JHUN J.G. et CHEN S.J., 2003b. Atmospheric loadings, concentrations and visibility associated with sandstorms: satellite and meteorological analysis. *Water, Air, and Soil Pollution, Focus* 3, 21-40.
- CYRANOSKI D., 2003. China plans clean sweep on dust storms. *Nature*, 421, 101.
- D'ALMEIDA G.A., 1986. A model for Saharan dust transport. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25, 903-916.
- DOMINICI F., SAMET J.M. et ZEGER S.L., 2000. Combining evidence of air pollution and daily mortality from twenty largest US cities. In *The national morbidity, mortality, and air pollution study. Part I: Methods and methodologic issues* (Samet J.M., Dominici F., Zeger S.L., Schwartz J. et Dockery D.W., eds.), Health Effects Institute, Research Report 94, Cambridge MA, pp. 61-74.
- ENGELSTAEDTER S., KOHFELD K.E., TEGEN I. et HARRISON S.P., 2003. Controls of dust emissions by vegetation and topographic depressions: An evaluation using dust storm frequency data. *Geophysical Research Letters*, 30, 1294, doi: 10.1029/2002GL016471.
- ERPICUM M. et OZER P., 1999. Observation des lithométéores pour le suivi de la désertification en Afrique de l'Ouest. Mise au point sur le recours aux observations synoptiques, *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 12, 342-351.
- ETT A.I. et OLORODE D.O., 1988. The effects of the Harmattan dust on air conductivity and visibility at Ibadan, Nigeria. *Atmospheric Environment*, 22, 2625-2627.
- GILLIES J.A., NICKLING W.G. et 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.
- GOUDIE A.S., 1996. Climate: Past and present. In *The physical geography of Africa* (Adams W.M., Goudie A.S. et Orme A.R.D., eds.), Oxford University Press, New York, pp. 34-59.
- GOUDIE A.S. et MIDDLETON N.J., 2001. Saharan dust storms: nature and consequences. *Earth-Science Reviews*, 56, 179-204.
- GRIFFIN D.W., GARRISON V.H., HERMAN J.R. et 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. et 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.
- HULME M., DOHERTY R., NGARA T., NEW M. et LISTER D., 2001. African climate change : 1900-2100, *Climate Research*, 17, 145-168.
- KALU A.E., 1979. The African dust plume : Its characteristics and propagation across West Africa in winter. In *Saharan dust : Mobilization, transport, deposition*, edited by D. Morales, pp. 95-118, Wiley, New York, Scope 14.
- LANCASTER N., 1996. Preface : Response of aeolian processes to global climate change. *Geomorphology*, 17, 1-2.
- MARTICORENA B., BERGAMETTI G., AUMONT B., CALLOT Y., N'DOUMÉ C. et LEGRAND M., 1997. Modeling the atmospheric dust cycle : 2. Simulation of Saharan dust sources. *Journal of Geophysical Research*, 102, 4387-4404.
- MIDDLETON N.J., 1985. Dust production in the Sahel – Reply to M. HULME, *Nature*, 318, 488.
- MIDDLETON N.J. et GOUDIE A.S., 2001. Saharan dust: sources and trajectories. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 26, 165-181.
- N'TCHAYI MBOUROU G., BERTRAND J.J. et 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.
- NICHOLSON S.E., 2001. Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries, *Climate Research*, 17, 123-144.
- NICHOLSON S.E., BA M.B. et KIM J.Y., 1996. Rainfall in the Sahel during 1994, *Journal of Climate*, 9, 1673-1676.
- O'HARA S.L., WIGGS G.F.S., MAMEDOV B., DAVIDSON G. et HUBBARD R.B., 2000. Exposure to airborne dust contaminated with pesticide in the Aral Sea region. *Lancet*, 355, 627-628.
- OZER P., 2000. Les lithométéores en région sahélienne : un indicateur climatique de la désertification. *GEO-ECOTROP*, 24, 1-317.
- OZER P., 2002. Dust variability and land degradation in the Sahel. *BELGEO*, 2002-2, 195-209.
- PAPASTEFANOUCI., MANOLOPOULOU M., STOULOS S., IOANNIDOU A. et GERASOPOULOS E., 2001. Coloured rain dust from Sahara Desert is still radioactive. *Journal of Environmental radioactivity*, 55, 109-112.
- 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., GINOUC P., TORRES O., NICHOLSON S.E. et 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 of Geophysics*, 40, 1, 1002, doi: 10.1029/2000RG000095.

- RODRIGUEZ S., QUEROL X., ALASTUEY A., KALLOS G. et 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. et MANTILLA E., 2003. Events affecting levels and seasonal evolution of airborne particulate matter concentrations in the Western Mediterranean. *Environmental Science & Technology*, 37, 216-222.
- RYALL D.B., DERWENT R.G., MANNING A.J., REDINGTON A.L., CORDEN J., MILLINGTON W., SIMMONDS P.G., O'DOHERTY S., CARSLAW N. et FULLER G.W., 2002. The origin of high particulate concentrations over the United Kingdom, March 2000. *Atmospheric Environment*, 36, 1363-1378.
- SAMET J.M., ZEGER S.L., DOMINICI F., CURRIERO F., COURSAK I., DOCKERY D.W., SCHWARTZ J. et ZANOBETTIA., 2000. *The national morbidity, mortality, and air pollution study. Part II: Morbidity and mortality from air pollution in the United States*, Health Effects Institute, Research Report 94, Cambridge MA, 82 p.
- TEGEN I. et FUNG I., 1995. Contribution to the atmospheric mineral aerosol load from land surface modification. *Journal of Geophysical Research*, 100, 18707-18726.
- TUCKER C.T. et NICHOLSON S.E., 1999. Variations in size of the Saharan Desert from 1980 to 1997. *Ambio*, 28, 587-591.
- VIANA M., QUEROL X., ALASTUEY A., CUEVAS E. et 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. et 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.
- World Health Organization (WHO), 1979. *Sulfur oxides and suspended particulate matter*. Environmental Health Criteria, 8. WHO, Geneva.
- World Health Organization (WHO), 2000. *Guidelines for air quality*. WHO, Geneva.
- WIGGS G.F.S., O'HARA S.L., WEGERD J., van der MEER J., SMAL I. et 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. *The Geographical Journal*, 169, 142-157.
- World Meteorological Organization (WMO), 1992. *International Meteorological Vocabulary*. WMO, Geneva.

Adresse de l'auteur :

Pierre OZER

Département des Sciences et Gestion de l'Environnement,

Université de Liège

Avenue de Longwy 185,

B-6700 Arlon, Belgique

pozer@ulg.ac.be