

Estimation de la pollution particulaire naturelle de l'air en 2003 à Niamey (Niger) à partir de données de visibilité horizontale

Environnement, Risques & Santé. Volume 4, Numéro 1, 43-9, Janvier-Février 2005, Article original

Auteur(s) : Pierre Ozer , Département des sciences et gestion de l'environnement, Université de Liège, Avenue de Longwy 185, B-6700 Arlon Belgique.

Résumé : Il est actuellement incontestable que l'augmentation de la concentration atmosphérique en particules en suspension totales (PST) et en particules respirables, à savoir celles dont la taille est inférieure à 10 μm (PM_{10}), 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 d'origine africaine affecte différents pays occidentaux pourtant très distants du Sahara. Cependant, aucune étude sur les niveaux de concentration en particules solides dans l'air des régions limitrophes du Sahara n'a été réalisée. Sur la base de mesures de la visibilité horizontale réduite par les lithométéores, les niveaux de concentration en particules solides sont estimés à 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. En effet, une concentration annuelle moyenne de 103 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ et de 67 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ est estimée respectivement pour les PST et les PM_{10} . Ces fortes concentrations en poussières dans l'air posent un réel problème de santé publique qui devrait retenir l'attention des décideurs politiques nationaux et internationaux.

Mots-clés : dimension particule, minéraux, Niger, polluants atmosphériques environnement, poussière, santé publique, surveillance environnement.

ARTICLE

Auteur(s) :, [Pierre Ozer](#)*

Département des sciences et gestion de l'environnement, Université de Liège, Avenue de Longwy 185, B-6700 Arlon Belgique

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 [1, 2]. Il est estimé que le Sahara et ses bordures injectent des quantités de poussières dans l'atmosphère variant entre 600 et 900.10⁶ tonnes par an [3-6], ce qui représenterait approximativement la moitié de la production mondiale de poussières minérales [7]. 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 [8-10]. En outre, il est maintenant irréfutable que la pollution de l'air causée par l'augmentation de la concentration atmosphérique en particules en suspension totales (PST) et en particules respirables, à savoir celles dont la taille est inférieure à 10 µm (PM₁₀), 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, en Espagne, en Grande-Bretagne, au Moyen-Orient ou encore dans le sud-est des États-Unis [11-16]. Cette pollution de l'air par une importante concentration en particules solides promeut les infections respiratoires, les maladies cardio-vasculaires et une multitude d'autres troubles de la santé [17-19]. Les particules respirables sont cause de morbidité et mortalité. Ainsi, il est estimé que chaque accroissement de 10 µg.m⁻³ en PM₁₀ est en moyenne associé à une augmentation de 0,74 % de la mortalité non accidentelle totale à court terme [20]. Pour ce qui est des poussières minérales, une augmentation de 7,66 % des maladies respiratoires (+ 1,12 % à chaque accroissement de 10 µg.m⁻³ en PM₁₀) et de 4,92 % de la mortalité totale (+ 0,72% à chaque accroissement de 10 µg.m⁻³ en PM₁₀) durant le passage de poussières désertiques originaires de Mongolie a été mise en évidence à Taipei (Taiwan) [21]. De plus, les poussières minérales ainsi emportées par le vent peuvent transporter des bactéries et des spores ; elles sont aussi parfois contaminées par des pesticides et peuvent même être radioactives [22-24]. Étonnamment, et malgré tous les effets indésirables de ces poussières sur la santé humaine, nul n'a idée des niveaux de concentration en particules en suspension totales (PST) dans les régions limitrophes du Sahara. En effet, ces informations ne sont disponibles en Afrique que pour Accra au Ghana, Nairobi au Kenya, et Le Cap en Afrique du Sud [18, 25]. En ce qui concerne la concentration en particules respirables (PM₁₀), aucune information n'est disponible en Afrique [25]. La région de Niamey se situe directement sous le vent de la dépression du Bodélé, bassin du lac Tchad (([figure 1](#))) qui s'avère être la première source de poussières minérales au monde [1, 2]. Une fois injectées dans l'atmosphère, ces poussières sont transportées vers le sud du Niger et le Nigeria avant d'atteindre le golfe de Guinée. Ce transport se fait à basse altitude durant la période de l'harmattan en saison sèche (novembre à avril) et, souvent, à des altitudes plus élevées le reste de l'année suite à la remontée du front intertropical vers le nord [26-28]. Sur la base des mesures de visibilité horizontale réduite par les poussières minérales dans l'air, cet article estime les niveaux de concentration en PST et en PM₁₀ à la station synoptique de Niamey-Aéroport (Niger) en utilisant différentes relations visibilité-concentration disponibles dans la littérature. L'étude se concentre sur l'analyse de l'année 2003.

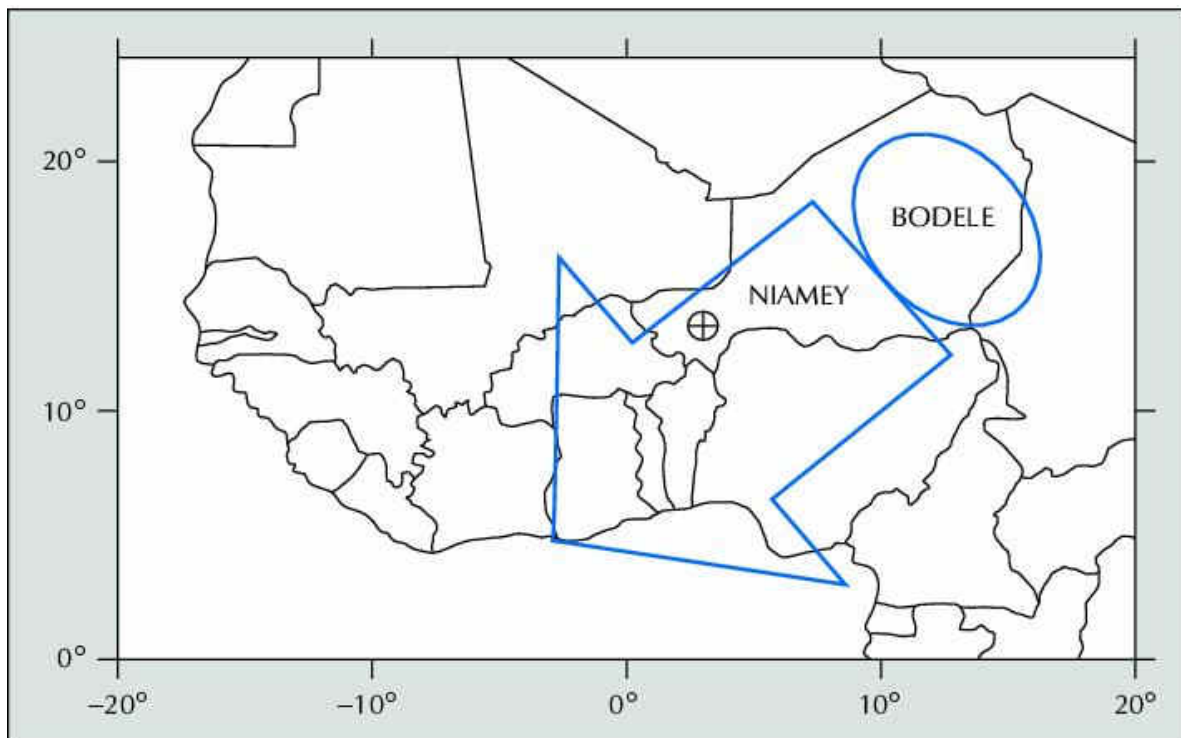


Figure 1 Localisation de la dépression fermée du Bodélé et de Niamey. La flèche indique la direction habituelle du transport des poussières minérales.

Données et méthode

Données de visibilité

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 (OMM) [29] 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 référence 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 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 poussières, 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 repère étant inversement proportionnelle à la distance du point d'observation, la marge d'erreur devrait être négligeable même si aucune tentative pour évaluer celle-ci n'a été tentée. La qualité de ces données a été largement discutée dans des études préalables [30, 31]. Cette étude ne considère que les visibilités réduites par des lithométéores, à savoir des « météores consistant en un ensemble de particules dont la plupart sont solides et non aqueuses. Ces particules sont plus ou moins en suspension dans l'atmosphère, ou soulevées du sol par le vent » [29].

Les données de visibilité horizontale ont été sélectionnées sur une base tri-horaire, à 3 heures, 6 heures, 9 heures, 12 heures, 15 heures, 18 heures, 21 heures, et 24 heures UTC¹, dans les observations synoptiques archivées à la direction de la Météorologie nationale du Niger. Aucune donnée n'est manquante et seules les visibilités horizontales inférieures à dix kilomètres sont considérées dans cette étude. Pour de plus grandes valeurs, l'air est supposé « pur » car les points de repère, au-delà de cette distance, sont peu nombreux et très espacés.

Niamey, à l'instar des autres villes des pays en développement, 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 sont que peu 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 a été répertorié à 42 reprises sur un total de 552 observations (7,6 % des cas) à Niamey-Aéroport durant l'année 2003. Ces valeurs ont été éliminées de notre échantillon. 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. Par ailleurs, en raison du trafic aérien restreint et du fait que la végétation est assez dense sur le périmètre de l'aéroport, les allées et venues des avions ne provoquent probablement pas de remise en mouvement des particules du sol. 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.

Estimation des concentrations en particules

Quelques études sur la relation entre visibilité horizontale et concentration en PST ont été menées en Afrique de l'Ouest (tableau 1). Bertrand [32] a étudié cette relation en se fondant sur trois années de données (1973 à 1975) durant la saison de l'harmattan à Niamey (équation 1). Les visibilités horizontales utilisées pour établir cette relation s'étalent de 1,5 à 12 kilomètres. Ben Mohamed et son équipe [33] ont utilisé les données de sept stations synoptiques au Niger durant 17 mois (équation 2). Ces auteurs considèrent tout le spectre des visibilités horizontales, à savoir de 100 mètres à 20 kilomètres. D'Almeida [4] est, à notre connaissance, le seul chercheur à avoir établi une relation liant la visibilité horizontale à la concentration de PM₁₀ (équation 3). Son étude se fonde sur les données recueillies en 1981 et 1982 dans onze stations synoptiques essentiellement réparties au sud du Sahara. Le coefficient de détermination (r^2) entre la concentration de poussières en PM₁₀ et la visibilité horizontale est de 0,95. La relation de D'Almeida [4] repose sur plus de 200 observations de visibilité horizontale variant de 200 mètres à 40 kilomètres. Toutes les relations existantes entre visibilité horizontale et concentration en masse de l'aérosol atmosphérique ont été testées d'un point de vue expérimental puis empirique.

Pour une visibilité donnée, les concentrations estimées à partir des différentes équations en PST montrent une légère variabilité. Ainsi, celles-ci varient entre 642 et 698 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ pour une visibilité horizontale réduite à 3 kilomètres, et entre 439 et 456 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ pour une visibilité horizontale réduite à 5 kilomètres. Ces faibles variations peuvent être expliquées par les différentes méthodes d'échantillonnage des concentrations en PST et le nombre de données utilisées pour établir les relations.

De plus, de rares études ponctuelles ont aussi été réalisées, qui permettent de faire une comparaison entre les mesures de visibilité horizontale et les concentrations en PST. Au Mali, Gillies et ses collègues [34] ont observé une concentration journalière en PST de 13 735 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ durant une brume sèche très dense ayant réduit la visibilité horizontale à moins de 100 mètres durant 24 heures. En Corée, Chung et son équipe [35] ont analysé

les invasions de lithométéores originaires de Chine et ont trouvé des concentrations moyennes en PST de 659 et 380 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ associées à des visibilité horizontales de respectivement 3 et 5 kilomètres. Ces rares informations sont du même ordre de grandeur que les valeurs obtenues par les deux premières relations présentées préalablement et utilisées par la suite. Les concentrations journalières en PST à la station de Niamey-Aéroport ont été obtenues en appliquant les équations aux huit données tri-horaires disponibles quotidiennement, puis en effectuant les moyennes sur les concentrations obtenues.

Les relations de Bertrand et Ben Mohamed et al. (équations 1 et 2, tableau 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 PST alors que l'équation 3 établie par D'Almeida (tableau 1) est appliquée pour nous renseigner sur la concentration en PM_{10} . Les résultats ainsi obtenus sont présentés aux pas de temps quotidien, mensuel et annuel. Ces informations sont ensuite comparées à quelques normes de qualité de l'air existantes dans différents pays. Il est néanmoins important de préciser que les normes de qualité de l'air et les risques pour la santé liés aux PM_{10} ont été établis pour une pollution urbaine. La composition des particules et l'interaction avec les autres pollutions ne sont pas les mêmes à l'aéroport de Niamey. Cependant, cela ne veut pas dire qu'il n'existe pas d'effets sur la santé dus à cette « pollution naturelle ».

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

Relation	Équation	Localisation	Auteurs
$C = 1\,897\, VV^{-0,91}$	(1) ^a	Niamey (Niger)	Bertrand [32]
$C = 1\,339,84\, VV^{-0,67}$	(2) ^a	7 stations (Niger)	Ben Mohamed et al. [33]
$C = 914,06\, VV^{-0,73} + 19,03$	(3) ^b	Agadez (Niger), ...	D'Almeida [4]

Résultats et discussion

Concentration journalière en PST

La ([figure 2](#)) présente la distribution de la fréquence des concentrations journalières en PST durant l'année 2003.

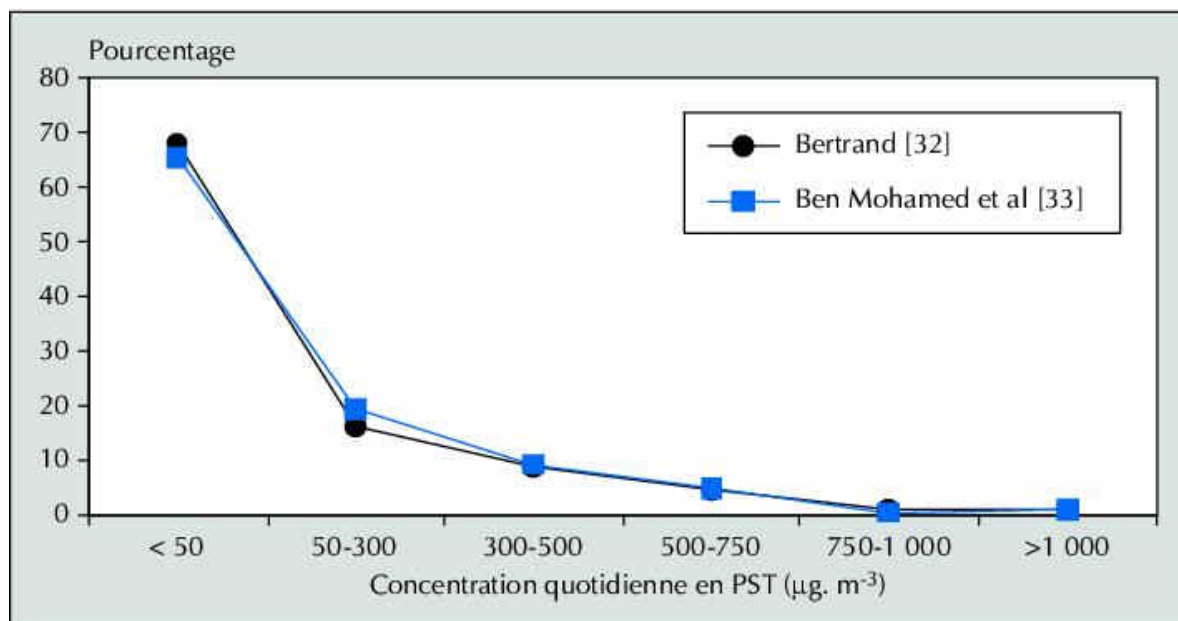


Figure 2 Distribution de la fréquence des concentrations journalières en PST à la station de Niamey-Aéroport pendant l'année 2003.

Durant ces deux dernières décennies, la concentration en PST était, pour ce qui est de la pollution par les particules, un des critères retenus pour le suivi de la qualité de l'air. Le seuil retenu par les différentes directives nationales sur la qualité de l'air était habituellement une concentration journalière en PST de $300 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ne pouvant être dépassée qu'un certain nombre de jours par an : 18 fois/an en Espagne [36], par exemple. Il apparaît que 67 % des jours analysés présentent une qualité de l'air excellente (PST < $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{j}^{-1}$). Cependant, des niveaux de concentration en PST préoccupants ($> 300 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{j}^{-1}$) s'observent dans 15 % des cas, soit 56 jours par an. Ce nombre de dépassements du seuil critique est extrêmement important (trois fois le maximum toléré en Espagne).

Concentration journalière en PM_{10}

Au fil des années, les pays développés ont fixé des normes de qualité de l'air relatives aux concentrations journalières en PM_{10} . Le seuil retenu par les différentes réglementations nationales sur la qualité de l'air varie de 50 à $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ pour la concentration journalière en PM_{10} [25]. La distribution de la fréquence des concentrations journalières en PM_{10} durant l'année 2003 est présentée à la ([figure 3](#)). Nous présentons ci-après 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 [37].

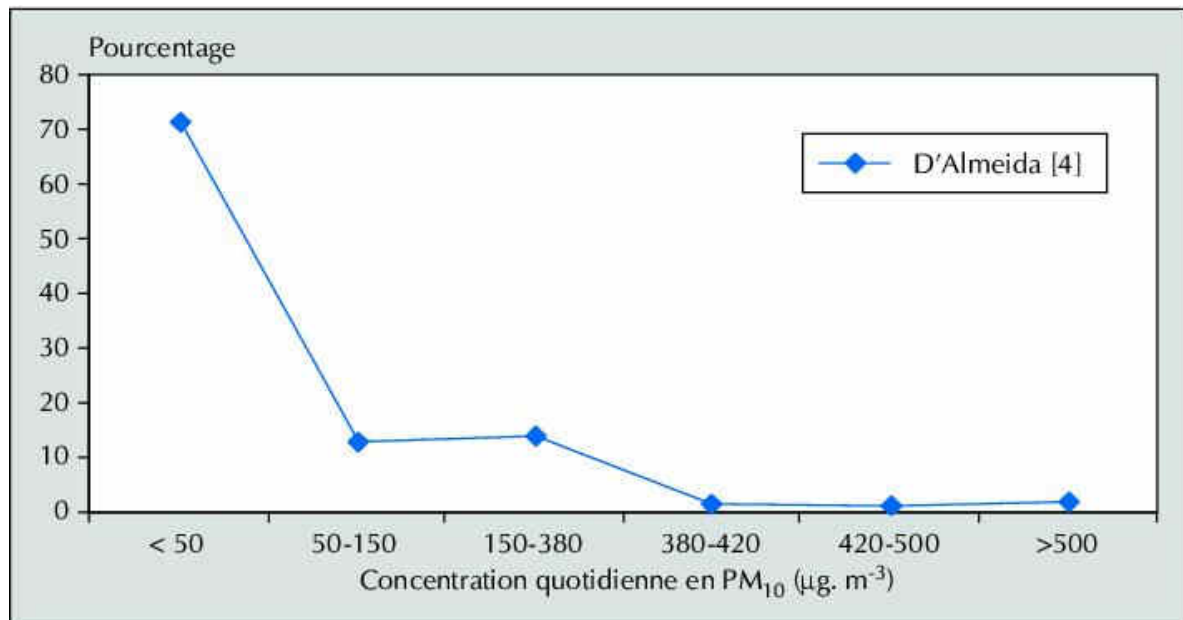


Figure 3 Distribution de la fréquence des concentrations journalières en PM_{10} à la station de Niamey-Aéroport pendant l'année 2003.

La concentration journalière limite en PM_{10} définie par l'Agence de protection environnementale américaine est de $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, ne devant pas être dépassée plus d'une fois par an. L'application de ce seuil à Niamey-Aéroport montre que 16,4 % des jours analysés (soit 60 jours) dépassent cette limite (([figure 3](#))). La qualité de l'air serait malsaine, très malsaine à médiocre, et dangereuse dans respectivement 13,4 %, 1,6 %, et 1,4 % des cas. Cela revient à dire qu'une qualité de l'air dangereuse ($\text{PM}_{10} > 500 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{j}^{-1}$), associée à la mort anticipée chez certaines catégories de personnes (vulnérables par rapport aux maladies respiratoires et cardiaques), a été observée à cinq reprises en 2003.

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 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ne pourra être dépassée que 35 jours par an en janvier 2005 et 7 jours par an en janvier 2010. Il apparaît que dans 29 % des cas, soit 106 jours en 2003, cette limite de $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a été dépassée à Niamey-Aéroport (([figure 3](#))) de plus de quinze fois la fréquence maximale qui sera tolérée dans l'Union européenne en 2010.

L'application de ces différentes directives sur la qualité de l'air aux valeurs estimées à Niamey-Aéroport est édifiante. Les concentrations en poussières minérales sont très importantes tant du point de vue de leur

magnitude que de la fréquence des pics de concentrations. 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.

Tableau 2 Niveaux quotidiens de pollution de l'air en PM_{10} ($\mu g.m^{-3}$) et effets observés sur la santé humaine (d'après [37]).

Niveau de pollution en PM_{10} (concentration en $\mu g.m^{-3}.j^{-1}$)	Qualité de l'air	Effets sur la santé
0-50	Excellente	–
50-150	Moyenne	–
150-380	Malsaine	Aggravation légère des symptômes des personnes sensibles (essentiellement maladies respiratoires) et irritation des voies respiratoires de la population en bonne santé.
380-420	Très malsaine	Aggravation significative des symptômes des personnes sensibles (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 sensibles (maladies respiratoires et cardiaques). Les personnes en bonne santé connaissent divers symptômes et maladies qui affectent leur activité normale.

Concentration mensuelle en PST et PM_{10}

Les valeurs de concentration mensuelle en PST et PM_{10} obtenues à Niamey-Aéroport pour 2003 sont présentées à la (*figure 4*). Il ressort de l'analyse de cette figure que les concentrations mensuelles en PST varient fortement selon les saisons. Un maximum est atteint durant les mois de janvier à mars qui représentent à eux seuls près de 65 % de la pollution atmosphérique annuelle. Les valeurs mensuelles sont alors de l'ordre de 230 à 330 $\mu g.m^{-3}$. La concentration mensuelle en PST baisse sévèrement à partir d'avril jusqu'en octobre ($< 40 \mu g.m^{-3}$), avant de connaître un pic secondaire au début de la saison sèche (novembre et décembre). Le profil obtenu pour les concentrations mensuelles en PM_{10} est similaire. Les mois de l'harmattan sont caractérisés par des valeurs mensuelles en PM_{10} qui sont de l'ordre de 160 à 200 $\mu g.m^{-3}$. Des concentrations en PM_{10} similaires (100 à 200 $\mu g.m^{-3}$) ont été observées en Irak, au Koweït et en Arabie Saoudite durant la saison la plus active du point de vue des processus éoliens [38]. Par ailleurs, des valeurs du même ordre de grandeur (112 à 255 $\mu g.m^{-3}$) ont été mesurées aux abords de la mer d'Aral durant la période la plus intense en tempêtes de sable [19].

Concentration annuelle en PST et PM_{10}

La concentration annuelle moyenne en PST est de 103 $\mu g.m^{-3}$ en 2003. Cette valeur est préoccupante puisqu'elle est plus élevée que la concentration annuelle guide de 60-90 $\mu g.m^{-3}$ produite par l'Organisation mondiale de la santé dans ses directives sur la qualité de l'air [39]. Cette valeur est cependant moins élevée que la concentration annuelle en PST de 137 $\mu g.m^{-3}$ mesurée à Accra (Ghana), la seule information disponible en Afrique de l'Ouest qui puisse nous permettre de faire une comparaison [25].

La concentration annuelle moyenne en PM_{10} est de 67 $\mu g.m^{-3}$ en 2003. La concentration annuelle maximum en PM_{10} définie par les différentes réglementations nationales sur la qualité de l'air varie actuellement de 40 à 60 $\mu g.m^{-3}$ [25]. Pour l'Union européenne, le seuil sera d'ailleurs abaissé à 20 $\mu g.m^{-3}$ par an dès janvier 2010. En matière de particules respirables, la station de Niamey-Aéroport présente donc des valeurs largement supérieures aux normes en vigueur dans les pays développés.

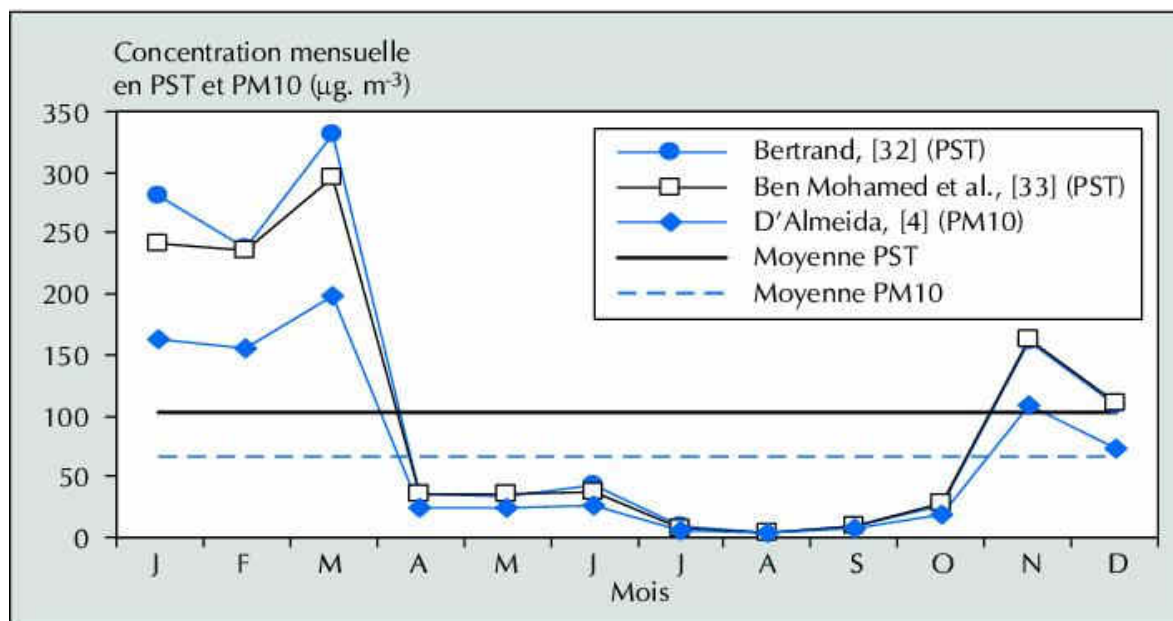


Figure 4 Concentration mensuelle en PST et PM₁₀ (µg.m⁻³) à la station de Niamey-Aéroport pendant l'année 2003.

Conclusion

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 annuelle en PST de 103 µg.m⁻³, soit largement au-dessus de la valeur maximale préconisée par l'Organisation mondiale de la santé, est extrêmement préoccupante dès lors que seule l'exposition aux poussières naturelles est prise en compte. Il en va de même pour la concentration annuelle en PM₁₀ qui, avec 67 µg.m⁻³ en 2003, dépasse largement les normes en vigueur dans les pays développés. Même si ces normes de qualité de l'air ont été établies pour une pollution urbaine, il n'en demeure pas moins que les poussières minérales sont nocives pour la santé humaine [17, 19, 21]. En outre, 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. À partir de ces résultats, les données de visibilité horizontale provenant d'autres régions arides et semi-arides de la planète pourraient être analysées pour nous permettre de délimiter les zones soumises à ce type de pollution naturelle de l'air.

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. En revanche, 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 [40], 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.

Références

- 1 Prospero JM, Ginoux P, Torres O, Nicholson SE, Gill TE. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the NIMBUS 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Rev Geophys* 2002 ; 40 : 2-1-31.
- 2 Washington R, Todd M, Middleton NJ, Goudie AS. Dust-storm source areas determined by the Total Ozone Monitoring Spectrometer (TOMS) and surface observations. *Ann Assoc Am Geogr* 2003 ; 93 : 299-315.
- 3 Callot Y, Marticorena B, Bergametti G. Geomorphologic approach for modelling the surface features of arid environments in a model of dust emissions : applications to the Sahara desert. *Geodin Acta* 2000 ; 13 : 245-70.
- 4 D'Almeida GA. A model for Saharan dust transport. *J Climate Appl Meteor* 1986 ; 25 : 903-16.
- 5 Marticorena B, Bergametti G, Aumont B, Callot Y, N'Doumé C, Legrand M. Modeling the atmospheric dust cycle : 2. Simulation of Saharan dust sources. *J Geophys Res* 1997 ; 102 : 4387-404.
- 6 Ozer P. Fifty years of African mineral dust production. *Bull Séanc Acad R Sci Outre-Mer* 2003 ; 49 : 371-93.

- 7 Goudie AS. Climate : Past and present. In : Adams WM, Goudie AS, Orme ARD, eds. The physical geography of Africa. New York : Oxford University Press, 1996 : 34-59.
- 8 Nicholson SE. Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries. *Climate Res* 2001 ; 17 : 123-44.
- 9 Ozer P. Dust variability and land degradation in the Sahel. *BELGEO* 2002 ; 2 : 195-209.
- 10 Tegen I, Fung I. Contribution to the atmospheric mineral aerosol load from land surface modification. *J Geophys Res* 1995 ; 100 : 18707-26.
- 11 Alpert P, Ganor E. Sahara mineral dust measurements from TOMS : comparison to surface observations over the Middle East for the extreme dust storm, March 14-17, 1998. *J Geophys Res* 2001 ; 106 : 18275-86.
- 12 Prospero JM. Long-term measurements of the transport of African mineral dust to the southeastern United States : Implications for regional air quality. *J Geophys Res* 1999 ; 104 : 15917-27.
- 13 Rodriguez S, Querol X, Alastuey A, Kallos G, Kakaliagou O. Saharan dust contributions to PM₁₀ and TSP levels in Southern and Eastern Spain. *Atmos Environ* 2001 ; 35 : 2433-47.
- 14 Rodriguez S, Querol X, Alastuey A, Viana M, Mantilla E. Events affecting levels and seasonal evolution of airborne particulate matter concentrations in the Western Mediterranean. *Environ Sci Technol* 2003 ; 37 : 216-22.
- 15 Ryall DB, Derwent RG, Manning AJ, et al. The origin of high particulate concentrations over the United Kingdom, March 2000. *Atmos Environ* 2002 ; 36 : 1363-78.
- 16 Viana M, Querol X, Alastuey A, Cuevas E, Rodriguez S. Influence of African dust on the levels of atmospheric particulates in the Canary Islands air quality network. *Atmos Environ* 2002 ; 36 : 5861-75.
- 17 Griffin DW, Kellogg CA, Shinn EA. Dust in the wind : Long range transport of dust in the atmosphere and its implications for global public and ecosystem health. *Glob Change Hum Health* 2001 ; 2 : 20-33.
- 18 World Health Organization (WHO). Guidelines for air quality. Geneva : WHO, 2000 ; 190 p.
- 19 Wiggs GFS, O'Hara SL, Wegerdt J, Van der Meer J, Small I, Hubbard R. The dynamics and characteristics of aeolian dust in dryland Central Asia : possible impacts on human exposure and respiratory health in the Aral Sea basin. *Geogr J* 2003 ; 169 : 142-57.
- 20 World Health Organization (WHO). Air quality guidelines for Europe. Copenhagen : WHO, 2000 ; 273 p.
- 21 Chen YS, Sheen PC, Chen ER, Liu YK, Wu TN, Yang CY. Effects of Asian dust storms events on daily mortality in Taipei, Taiwan. *Environ Res* 2004 ; 95 : 151-5.
- 22 Griffin DW, Garrison VH, Herman JR, Shinn EA. African desert dust in the Caribbean atmosphere : Microbiology and public health. *Aerobiologia* 2001 ; 17 : 203-13.
- 23 O'Hara SL, Wiggs GFS, Mamedov B, Davidson G, Hubbard RB. Exposure to airborne dust contaminated with pesticide in the Aral Sea region. *Lancet* 2000 ; 355 : 627-8.
- 24 Papastefanou C, Manolopoulou M, Stoulos S, Ioannidou A, Gerasopoulos E. Coloured rain dust from Sahara Desert is still radioactive. *J Environ Radioact* 2001 ; 55 : 109-12.
- 25 Baldasano JM, Valera E, Jiménez P. Air quality data from large cities. *Sci Total Environ* 2003 ; 307 : 141-65.
- 26 Afeti GM, Resch FJ. Physical characteristics of Saharan dust near the Gulf of Guinea. *Atmos Environ* 2000 ; 34 : 1273-9.
- 27 Kalu AE. The African dust plume : Its characteristics and propagation across West Africa in winter. In : Morales D, ed. Saharan dust : Mobilization, transport, deposition. Scope 14. New York : Wiley, 1979 : 95-118.
- 28 Middleton NJ, Goudie AS. Saharan dust : sources and trajectories. *Trans Inst Br Geogr* 2001 ; 26 : 165-81.
- 29 World Meteorological Organization (WMO). International Meteorological Vocabulary. Geneva : WMO, 1992 ; 784. p.
- 30 Middleton NJ. Dust production in the Sahel – Reply to M. Hulme. *Nature* 1985 ; 318 : 488.
- 31 Ozer P. Les lithométéores en région sahélienne : un indicateur climatique de la désertification. *GEO-ECO-TROP* 2001 ; 24 : 1-317.
- 32 Bertrand J. Visibilité et brume sèche en Afrique. *La météorologie* 1976 ; 6 : 201-11.
- 33 Ben Mohamed A, Frangi JP, Fontan J, Druilhet A. Spatial and temporal variations of atmospheric turbidity and related parameters in Niger. *J Appl Meteorol* 1992 ; 31 : 1286-94.

34 Gillies JA, Nickling WG, McTainsh GH. Dust concentrations and particle-size characteristics of an intense dust haze event : inland delta region, Mali, West Africa. *Atmos Environ* 1996 ; 30 : 1081-90.

35 Chung YS, Kim HS, Park KH, Jhun JG, Chen SJ. Atmospheric loadings, concentrations and visibility associated with sandstorms : satellite and meteorological analysis. *Water Air Soil Pollut* 2003 ; Focus 3 : 21-40.

36 Artiñano B, Querol X, Salvador P, Rodríguez S, Alonso DG, Alastuey A. Assessment of airborne particulate levels in Spain in relation to the new EU-directive. *Atmos Environ* 2001 ; 36 : 43-53.

37 In : Boubel RW, Fox DL, Turner DB, Stern AC, eds. *Fundamentals of air pollution*. London : Academic Press, 1994 : 574.

38 Draxler RR, Gillette DA, Kirkpatrick JS, Heller J. Estimating PM₁₀ air concentrations from dust storms in Iraq, Kuwait and Saudi Arabia. *Atmos Environ* 2001 ; 35 : 4315-30.

39 World Health Organization (WHO). *Sulfur oxides and suspended particulate matter. Environmental Health Criteria 8*. Geneva : WHO, 1979 ; 107 p.

40 Black RE, Morris SS, Bryce J. Where and why are 10 million children dying every year? *Lancet* 2003 ; 361 : 2226-34.

[1 UTC : temps universel coordonné \(Coordinated universal time\).](#)