Pollution atmosphérique
ISSN : 2268-3798
Éditeur : Association pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique

236 | 2018
Varia

Les lithométéores au Nord Sénégal : dégradation de la qualité de l'air, réduction de la visibilité horizontale et conséquences socio-économiques

The lithometeors in North Senegal: degradation of air quality, reduction of horizontal visibility and socio-economic consequences

M. Demba Gaye

https://www.peren-revues.fr/pollutionatmospherique/6450

DOI : 10.4267/pollution-atmospherique.6450

Référence électronique
M. Demba Gaye, « Les lithométéores au Nord Sénégal : dégradation de la qualité de l'air, réduction de la visibilité horizontale et conséquences socio-économiques », *Pollution atmosphérique* [En ligne], 236 | 2018, mis en ligne le 15 septembre 2018, consulté le 28 février 2026. URL : https://www.peren-revues.fr/pollutionatmospherique/6450

Droits d'auteur
CC-BY

Les lithométéores au Nord Sénégal : dégradation de la qualité de l'air, réduction de la visibilité horizontale et conséquences socio-économiques

The lithometeors in North Senegal: degradation of air quality, reduction of horizontal visibility and socio-economic consequences

M. Demba Gaye

PLAN

1. Introduction
2. Données et méthodes
3. Résultats
   3.1. Épisodes de poussières et qualité de l'air au Nord du Sénégal
   3.2. Épisodes de poussières et réduction de la visibilité horizontale au nord du Sénégal
   3.3. Conséquence de la mauvaise visibilité horizontale sur les activités socio-économiques au Nord du Sénégal
4. Discussion et conclusion

TEXTE

1. Introduction

1 Dans le cadre de cet article, la zone d'étude couvre les stations synoptiques météo et qualité de l'air (mesurant les PM_{10}) de Matam, Podor et Saint-Louis que nous considérons d'ailleurs comme véritable région Nord du Sénégal (figure 1). Il s'agit là de la première bande du pays réceptrice des influences climatiques du Sahara et du Sahel. Sa particularité réside dans sa diversité climatique. En effet, si sa partie ouest se distingue par son climat doux, son centre et surtout son extrémité est sont en grande partie sous l'influence de l'alizé continental (Harmattan) chaud et sec. C'est du côté pluviométrique que résiderait l'homogénéité de la région. Cette partie du Sénégal se caractérise dans sa généralité par sa faible hauteur des

précipitations annuelles, avec une alternance d'années excédentaires et déficitaires.

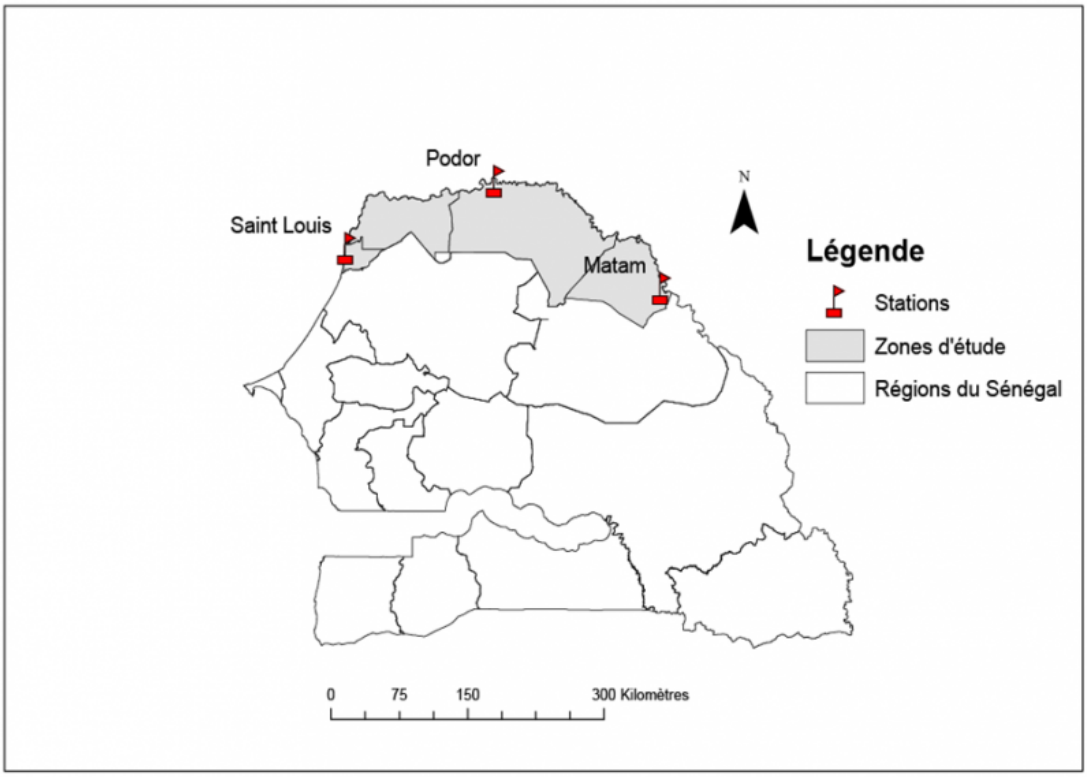


Figure 1. Localisation de la zone d'étude, et stations météorologiques et qualité de l'air.
Location of the study area.

Parallèlement à l'aspect pluviométrique, des événements de lithométéores (brume sèche, brume de poussière, vent de sable et tempête de poussière) sont devenus de véritables types de temps caractéristiques de cette région. Généralement, depuis l'avant-sécheresse, une dizaine voire plusieurs dizaines d'épisodes affectent chaque année cette partie du pays. Par leur fréquence et leur niveau de concentrations élevées en particules, l'essentiel de ces épisodes dégradent fortement la qualité de l'air. En outre, la conséquence première, du moins la plus manifeste, de ces événements de poussières désertiques, reste la réduction de la Visibilité Horizontale (VH), qui par ailleurs constitue même jusqu'ici le premier critère de détermination de la présence de lithométéores. De nombreux travaux, notamment en région sahélienne, ont montré que les mauvaises VH induites par la présence de

lithométéores impactent, sinon sont susceptibles d'impacter la pratique d'activités socio-économiques. Ces impacts restent cependant très inégalement répartis dans les différentes régions suivant les types d'activités susceptibles d'être exposées. Si la majeure partie de ces travaux pointe du doigt le transport aérien, du fait notamment que les zones étudiées abritent les principaux sites aéroportuaires où les flux aériens restent importants, au Nord Sénégal par contre, c'est plutôt le secteur du transport routier et les activités de commerce qui sont concernées par les mauvaises VH dues à la présence des poussières désertiques.
L'objectif de cet article est de vérifier ces événements de pollutions particulaires qui dégradent la qualité de l'air au Nord Sénégal et ainsi de définir les impacts environnementaux et socio-économiques qui en découlent. Il s'agit donc :

- d'évaluer la fréquence des épisodes de lithométéores susceptibles de dégrader la qualité de l'air au Nord Sénégal de 1965 à 2014 ;
- de caractériser la dégradation de la qualité de l'air au travers de l'étude des concentrations journalières en PM_{10} au Nord Sénégal comparativement aux normes de l'OMS et à la norme sénégalaise sur la qualité de l'air ;
- d'étudier la réduction de la visibilité horizontale journalière et saisonnière par les poussières désertiques aux différentes stations du Nord Sénégal ;
- de vérifier la corrélation entre les concentrations en particules de lithométéores et la réduction de la visibilité horizontale aux stations du Nord Sénégal sur la période 1965-2014 ;
- de décrire et analyser les conséquences des fortes réductions de la visibilité horizontale (mauvaise visibilité) sur les activités socio-économiques au Nord Sénégal.

Pour atteindre ces objectifs, nous présenterons ci-dessous (chapitre II) les données utilisées et méthodes adoptées dans ce travail. Dans le chapitre III (résultats), nous évaluerons en premier les épisodes de poussières et la qualité de l'air au Nord Sénégal, ensuite nous aborderons la réduction de la visibilité horizontale par ces épisodes de poussières au Nord Sénégal et enfin nous verrons comment la mauvaise visibilité horizontale due à ces évènements de lithométéores impacte les activités socio-économiques dans cette région septentrionale du Sénégal. Dans le chapitre IV, nous procède-

rons d'abord à la discussion de ces différents résultats, avant de conclure et de souligner les perspectives qui s'ouvrent suite à cette étude.

2. Données et méthodes

2 Les données utilisées dans cette étude sont à la fois des données quantitatives (nombre annuel d'épisodes de PM_{10}, concentrations journalières en PST et en PM_{10},visibilité horizontale réduite par les événements de lithométéores) et des données qualitatives (vulnérabilité des secteurs du transport routier et du commerce aux mauvaises visibilités horizontales). Il s'agit là des données des stations de Matam, Podor et Saint-Louis. Les données quantitatives couvrent une série de 50 ans d'observation (1965-2014).

3 Pour évaluer les épisodes de poussières au Nord Sénégal, nous considérerons le nombre annuel d'épisodes de PM_{10} dans les différentes stations de la région de l'avant-sécheresse à l'actuel. L'évaluation du degré de dégradation de la qualité de l'air se fera en étudiant les niveaux journaliers de PM_{10} durant ces épisodes, comparativement aux valeurs guides de l'OMS et normes du Sénégal.

4 Pour vérifier la réduction de la visibilité horizontale par les événements de lithométéores dans chacune des stations de la zone, nous commencerons d'abord par une analyse au pas de temps quotidien et mensuel/saisonnier. Le but est de voir à quelle période de la journée et de l'année la visibilité horizontale est la plus affectée par les événements de poussières désertiques. Ensuite, nous étudierons la fréquence de la visibilité réduite à 10 km, à 5 km et à 1 km. La première raison est que ces distances sont révélatrices de l'importance de la dégradation de l'air, et la seconde raison, d'ailleurs la plus importante, réside dans les éventuels impacts, notamment sur les activités socio-économiques dépendant de la distance à laquelle la visibilité est réduite par les lithométéores. Enfin, nous calculerons la corrélation entre visibilité horizontale réduite et concentration en PM_{10} aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam sur notre période d'observation. Nous utiliserons à l'aide du logiciel Khronostat le test de corrélation *r* de Pearson dont la formule est la suivante :

$$r = \frac{\mathrm{cov}(X, Y)}{\sigma_x \sigma_y}$$

5 avec :
Cov (XY) : covariance de XY ;
σ_x : écart-type de X ;
σ_y : écart-type de Y.

6 L'objectif de cet exercice est de vérifier l'intensité des liens qui existeraient entre ces deux paramètres dans cette partie sahélienne du Sénégal.

7 Enfin, pour ce qui concerne les conséquences de la mauvaise visibilité horizontale due à ces événements de lithométéores sur les activités socio-économiques dans cette région septentrionale du Sénégal, nous avons élaboré et adressé un questionnaire aux acteurs concernés (transporteurs routiers et commerçants). Nous procéderons dans ce sens au dépouillement et à l'analyse des réponses aux questions de l'enquête. Le but de cette enquête est d'abord de savoir si ces activités sont affectées lors de forte réduction de visibilité par les poussières désertiques, ensuite comment elles le sont, et quels risques présentent ces événements de mauvaise visibilité dans la pratique de ces activités.

3. Résultats

3.1. Épisodes de poussières et qualité de l'air au Nord du Sénégal

8 Le Nord du Sénégal est marqué par un nombre important d'épisodes de poussières. Depuis l'avant-sécheresse, une dizaine, voire plusieurs dizaines, d'épisodes de concentrations élevées en particules (concentrations dépassant les valeurs guides de l'OMS fixées à 50 µg/m^3 en moyenne journalière et la norme sénégalaise sur la qualité de l'air définissant les valeurs limites journalières à 260 µg/m^3) affectent chaque année cette partie du pays (tableau 1).

Tableau 1. Nombre annuel d'épisodes de PM_{10} dans les stations Nord du Sénégal, de 1965 à 2014.

Annual number of episodes of PM_{10} in the Northern resorts of Senegal from 1965 to 2014.

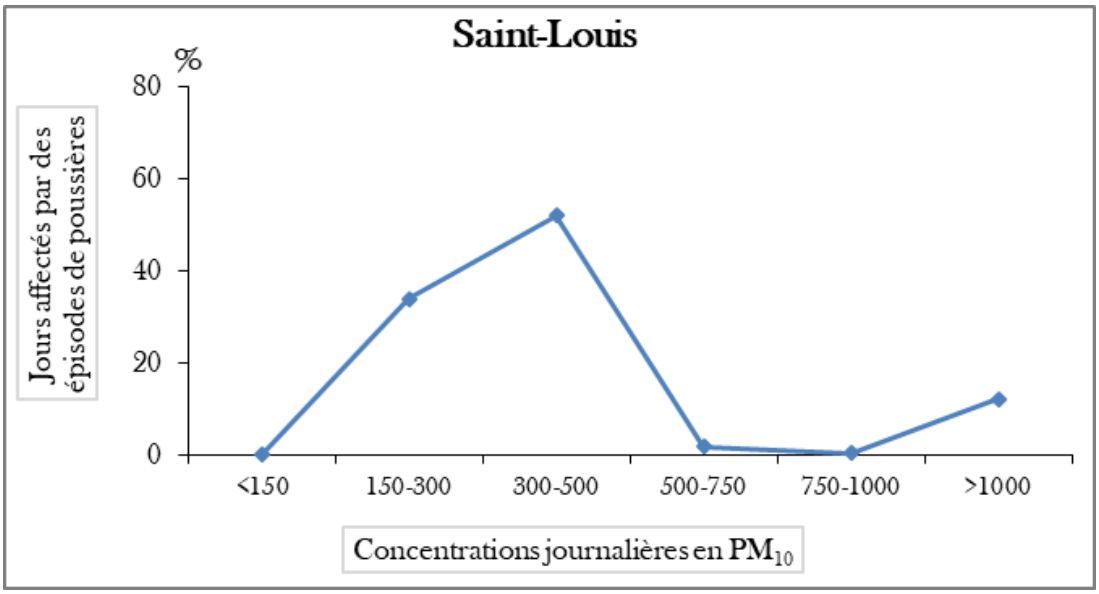
	Nombre d'épisodes de fortes concentrations de PM_{10} dues à des lithométéores				Nombre d'épisodes de fortes concentrations de PM_{10} dues à des lithométéores		
Stations / **Années**	Saint-Louis	Podor	Matam	**Stations** / **Années**	Saint-Louis	Podor	Matam
1965	67	77	49	1990	137	34	36
1966	26	25	55	1991	67	21	26
1967	31	37	23	1992	57	28	25
1968	55	46	28	1993	90	28	50
1969	41	43	18	1994	17	9	16
1970	63	12	20	1995	99	6	10
1971	46	52	39	1996	53	2	2
1972	55	54	43	1997	22	11	15
1973	44	49	38	1998	35	19	14
1974	46	40	34	1999	14	3	10
1975	34	31	27	2000	27	2	3
1976	72	65	53	2001	11	6	6
1977	67	66	54	2002	28	10	8
1978	35	33	20	2003	27	25	11
1979	34	35	27	2004	17	8	15
1980	46	39	37	2005	23	13	17
1981	45	37	29	2006	17	10	15
1982	40	38	43	2007	18	7	6
1983	51	155	125	2008	5	9	8
1984	59	171	80	2009	9	7	11
1985	46	185	78	2010	12	6	8
1986	75	80	117	2011	15	14	13
1987	103	123	90	2012	25	22	18
1988	140	51	55	2013	6	16	21
1989	114	23	34	2014	26	33	34

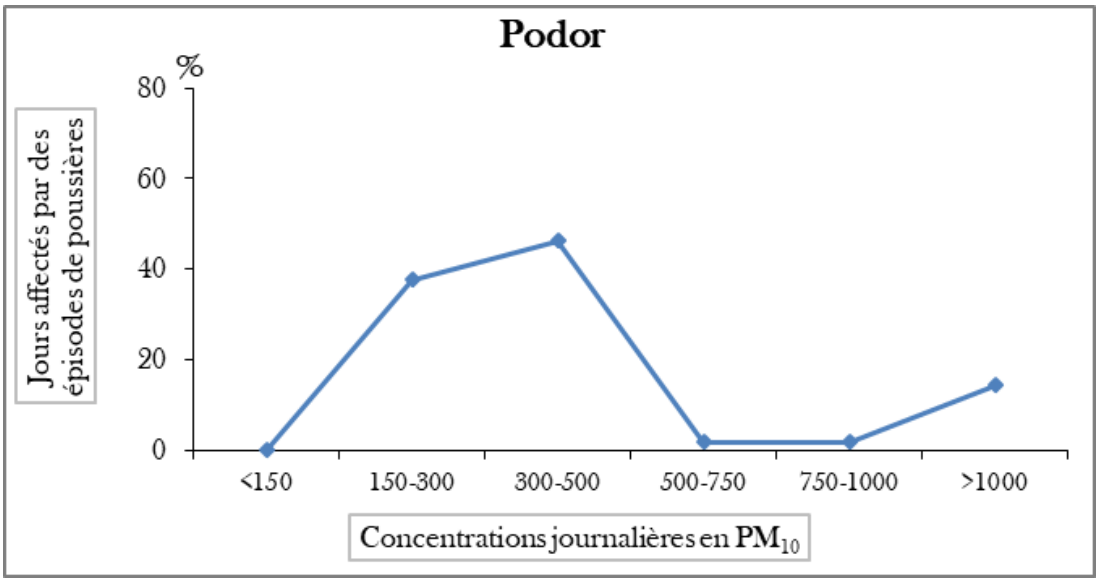
9 L'analyse chimique des particules de poussières collectées au niveau de nos stations de PM_{10} révèle que ces dernières présentent une teneur composée de 75 % à 85 % de silicium, aluminium, calcium et fer. Ces résultats prouvent que les épisodes de PM_{10} sont bien d'origine terrigène, ceci conformément aux observations de plusieurs auteurs (Schütz et Rahn, 1982 ; Marticorena et Bergametti, 1996 ; Laurent *et al.*, 2008 ; Mokhtari, 2012) qui soutiennent qu'au Sahel et en Afrique au nord de l'équateur, les poussières désertiques proviennent de lacs asséchés, et les caractéristiques physicochimiques des particules sont très proches de celles du matériau

d'origine, avec des concentrations élevées en silicium, aluminium, calcium et fer.

10 En considérant la période 1992-2014, la fréquence annuelle d'épisodes de concentration en PM_{10} varie entre 5 (en 2008) et 90 (en 1993) à la station de Saint-Louis, entre 2 (en 1996 et 2000) et 33 (en 2014) à la station de Podor, et entre 2 (en 1996) et 50 (en 1993) à la station de Matam (tableau 1). De 1965 à 2014, la fréquence moyenne annuelle d'épisodes de poussières dégradant la qualité de l'air est respectivement de 46, 38 et 32 pour les stations de Saint-Louis, Podor et Matam.

11 D'Almeida et Gaye (2016) notaient que, comparées aux valeurs guides de l'OMS fixant pour les PM_{10} une concentration moyenne journalière de 50 µg/m^3, les valeurs quotidiennes lors d'épisodes de poussières dégradant la qualité de l'air sont très préoccupantes au nord du Sénégal. Quelle que soit la station considérée, 80 % à environ 85 % des jours affectés par de tels épisodes connaissent des niveaux de concentrations en particules fines (PM_{10}) de 150 à 500 µg.m^{-3} (figure 2).





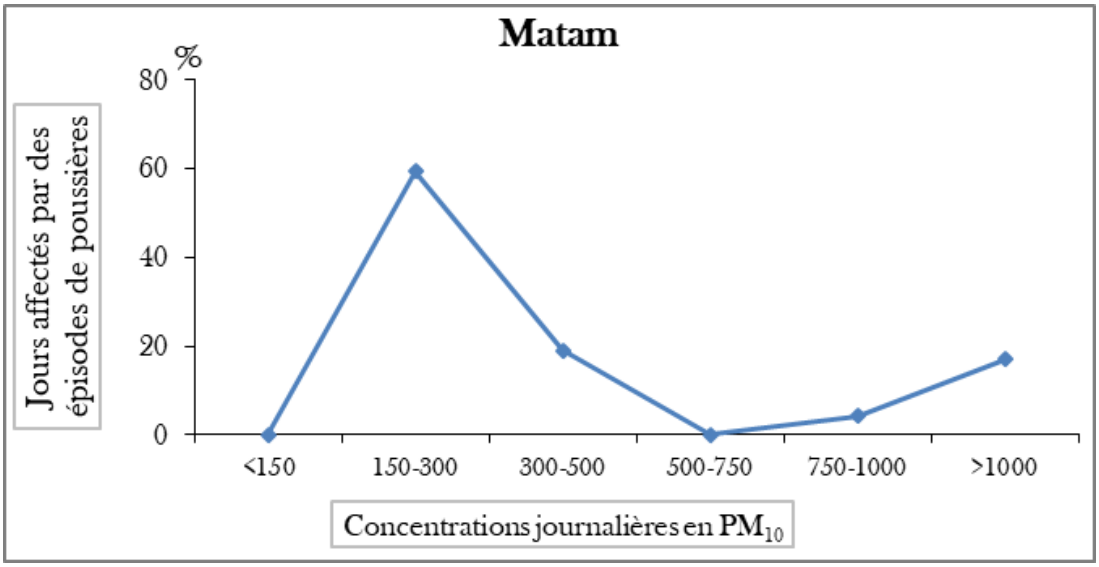


Figure 2. Fréquence annuelle moyenne des concentrations journalières en PM_{10} aux stations Nord du Sénégal (1965-2014).
Average annual frequency of daily PM10 concentrations at the Northern stations of Senegal (1965-2014).

L'étude de l'impact des épisodes de poussières désertiques sur la qualité de l'air doit, au-delà des valeurs guides fixées par l'OMS, se focaliser sur les valeurs limites nationales, du fait que ces dernières peuvent varier selon le pays, et ainsi être plus ou moins strictes. Au Sénégal, les valeurs limites journalières de concentration moyenne en PM_{10} sont fixées à 260 µg/m^3

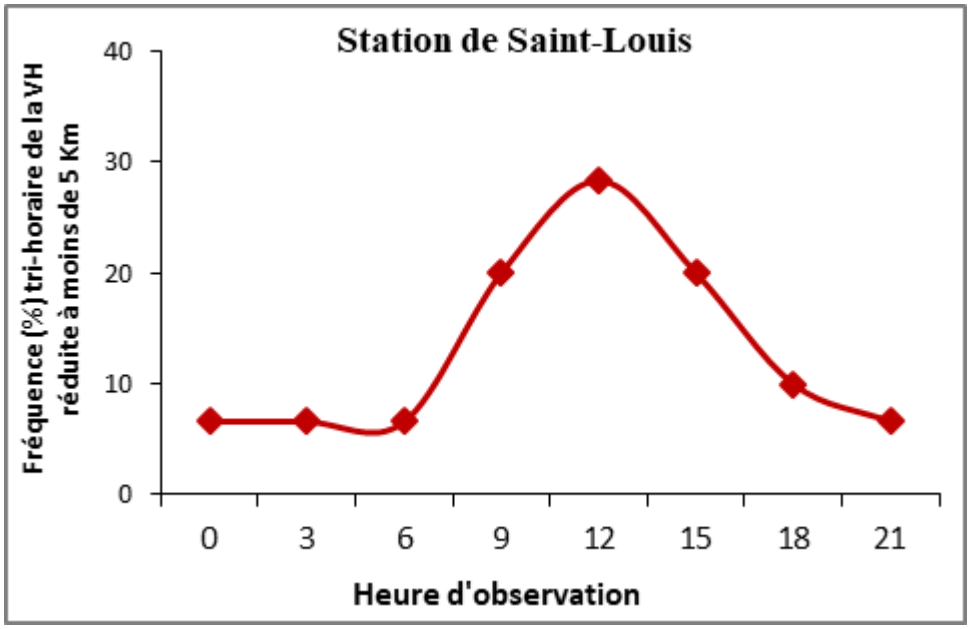
(norme sénégalaise NS 05-065 d'octobre 2003). Si nous comparons nos résultats à ces valeurs limites sénégalaises, 60 à 70 % de la concentration moyenne journalière en PM_{10} dans les stations nord du Sénégal dépassent largement cette valeur guide (à Saint-Louis, Podor et Matam, respectivement 71 %, 68 % et 62 % de la concentration moyenne journalière en PM_{10} sont supérieurs à 260 µg/m^3). Plus inquiétant encore, 13 à 17 % de ces épisodes de poussières présentent une concentration supérieure à 1 000 µg/m^3 dans ces stations septentrionales du pays. N'est-il pas utile de souligner que, juste au-dessus de 150 µg.m^{-3}, la qualité de l'air est déjà jugée malsaine, et que si la concentration en PM_{10} dépasse 500 µg.m^{-3}, elle est qualifiée de dangereuse. De tels niveaux de concentrations en PM_{10} dans cette partie purement sahélienne du Sénégal attestent alors de la fréquence importante de jours à mauvaise qualité de l'air.
Si, du fait de leur taille, les particules peuvent être inhalées et donc présenter une toxicité sur la santé des personnes exposées, la réduction de la visibilité horizontale reste néanmoins le premier indicateur de la présence de ces lithométéores et, par conséquent, l'impact environnemental le plus apparent et immédiat de ces derniers.

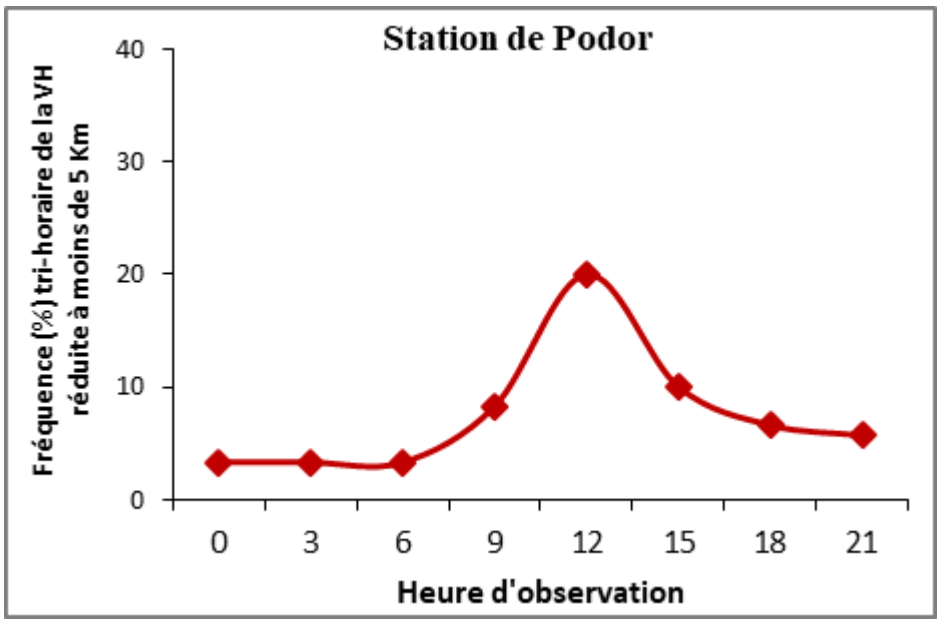
3.2. Épisodes de poussières et réduction de la visibilité horizontale au nord du Sénégal

12 L'impact environnemental direct des poussières désertiques se traduit par la réduction de la Visibilité Horizontale (VH). Elle est directement liée au pouvoir rétrodiffusant des poussières et est directement proportionnelle à la quantité de particules présentes dans l'atmosphère. Au Nord Sénégal, la réduction de VH à 10 km, à 5 km et à 1 km par les lithométéores est respectivement associée à des concentrations moyennes de poussières de 259 µg.m^{-3}, de 447 µg.m^{-3} et de 1618 µg.m^{-3}.

13 Aux stations du Nord Sénégal, la réduction de la visibilité en raison de la présence de poussières désertiques est maximale au cœur de la journée, aux heures de fréquence maximum de lithométéores c'est-à-dire généralement entre 9 heures et 15 heures, et le minimum de cette réduction de visibilité est enregistré au milieu de la nuit, aux heures de fréquence minimum de lithométéores, généralement entre 21 heures et 3 heures (figure 3). Il s'agit là d'une question de stabilité

thermique de l'air, et donc de circulation atmosphérique. En effet, la nuit, les mouvements verticaux de l'air sont dirigés vers le bas, contrairement au jour où nous assistons à un réchauffement et donc à une instabilité de l'air. Cette instabilité diurne permet ainsi au vent de soulever plus facilement les particules.





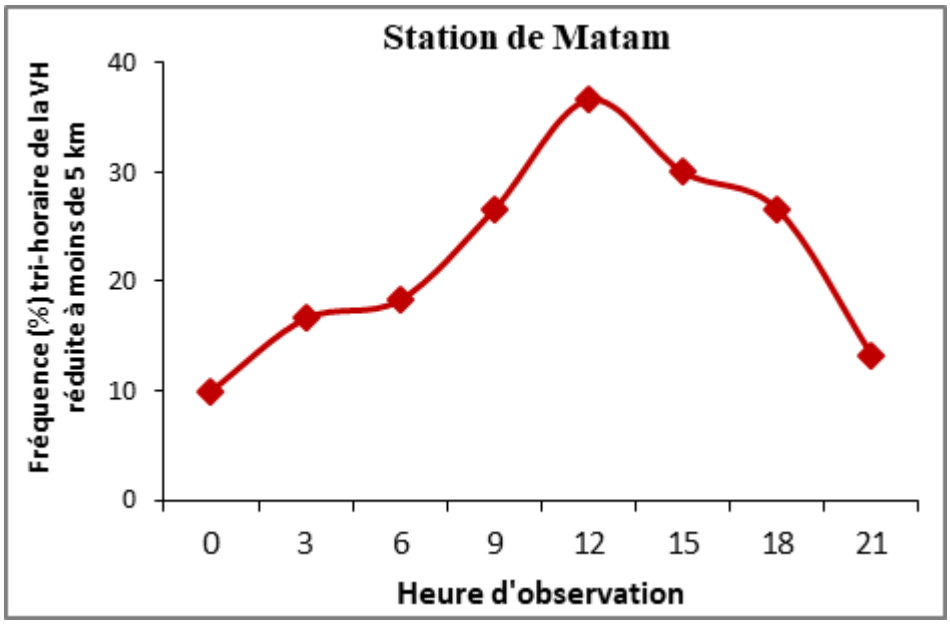


Figure 3. Évolution journalière de la réduction de visibilité horizontale (< 5 km) pour cause de présence de lithométéores au Nord Sénégal (1965-2014).
Daily evolution of horizontal visibility reduction (km) due to presence of lithometeors in Northern Senegal (1965-2014).

Nous devrons souligner qu'au centre et à l'est de la zone, une très forte réduction de la VH pour cause de poussières désertiques peut être constatée un peu plus tôt, dès les premières heures de la journée, du fait qu'il arrive qu'il se présente à ces heures des événements de lithométéores de fortes concentrations en particules. Ceci pourrait être expliqué par la proximité de ces stations avec la source de poussières sud-mauritanienne. Celle-ci est située dans une zone dont les sols sont constitués de substrats argileux et salins, potentiellement favorables à la mobilisation par les vents (Coude-Gaussen, 1990). Cette source, pouvant être très active dès les premières heures de la journée, fournit d'énormes quantités de particules de lithométéores, particulièrement aux stations centre (Podor) et est (Matam) du Nord Sénégal, se trouvant par ailleurs sur la principale trajectoire de ces poussières désertiques sud-mauritaniennes.
Au Nord du Sénégal, les jours affectés par les poussières désertiques connaissent une VH majoritairement réduite à moins de 10 km (figure 4). Aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam, la réduction à cette distance représente respectivement 55, 65 et 74 % de la fréquence journalière. La

réduction de la visibilité à moins de 5 km représente quant à elle respectivement 31, 21 et 11 %. Cette réduction journalière à moins de 5 km témoigne d'une densité importante de poussières. Il est aussi important de souligner le pourcentage de la fréquence journalière de la réduction de visibilité à moins de 1 km (figure 4).

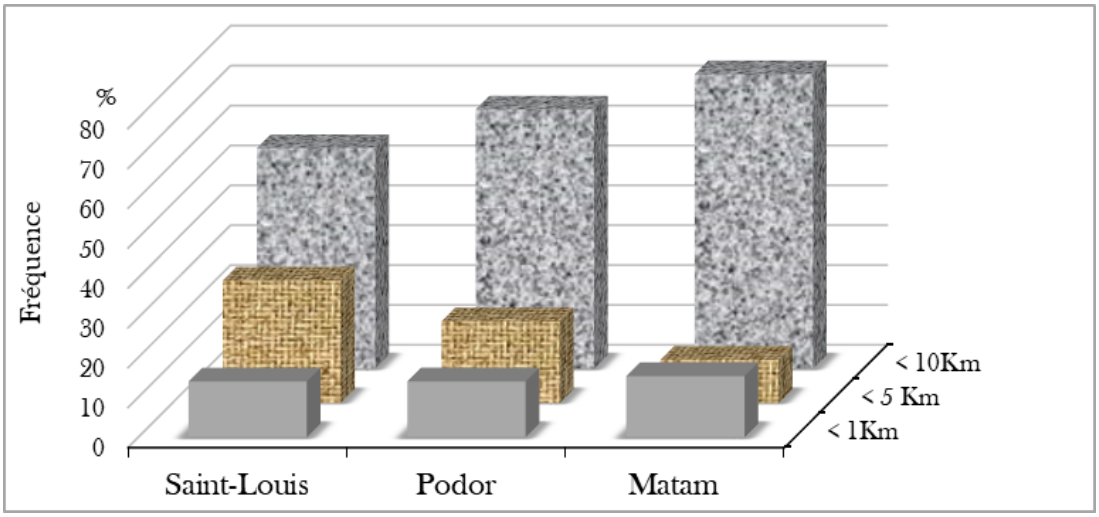
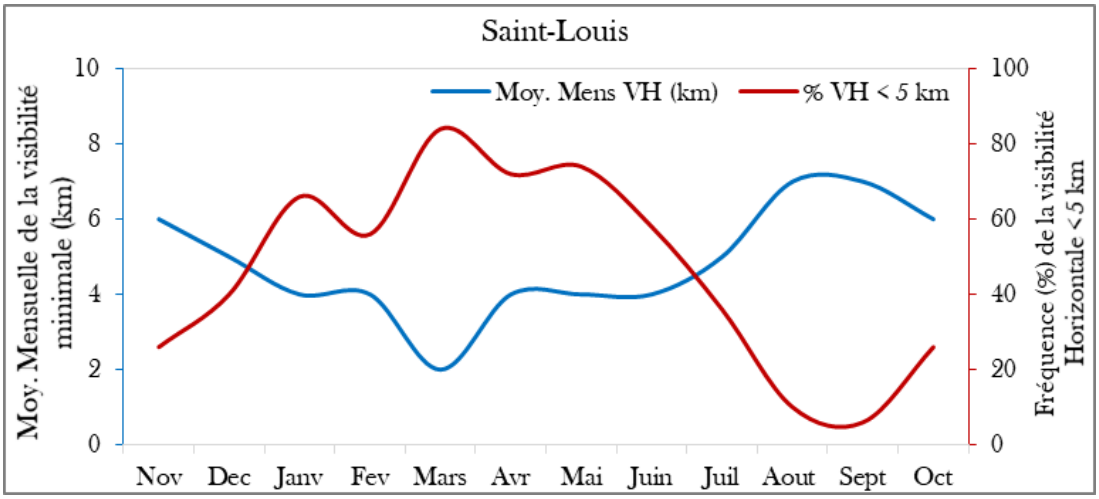


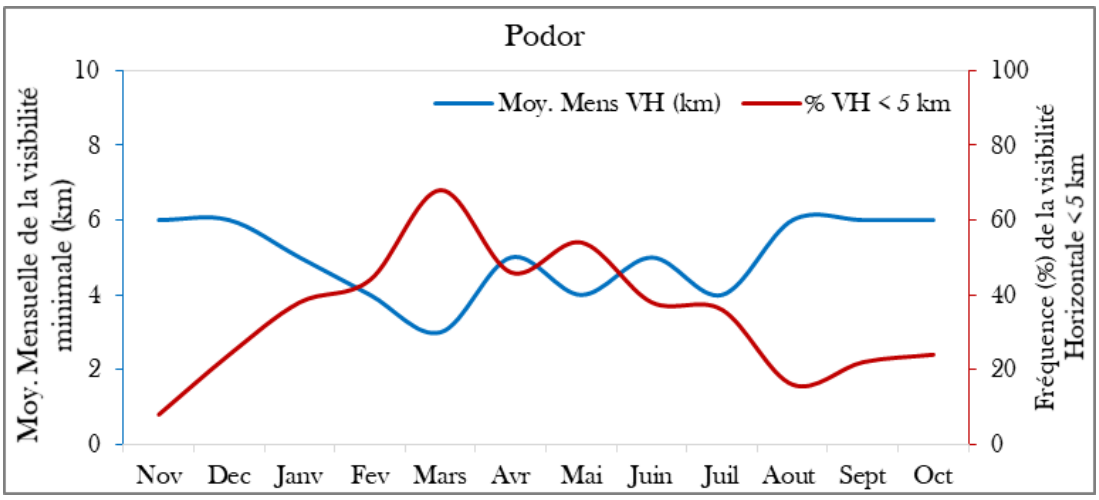
Figure 4. Répartition journalière de la VH < 10 km, de la VH < 5 km et de la VH < 1 km pour cause de lithométéores dans les stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1965-2014).

Daily distribution of horizontal visibility (VH) <10 km, horizontal visibility <5 km and horizontal visibility <1 km due to lithometeors in the Saint-Louis, Podor and Matam stations (1965-2014).

La réduction de la visibilité à cette distance témoigne des concentrations extrêmement élevées en poussières. 14 % des jours affectés par les poussières désertiques à l'ouest et au centre, et 15 % à l'est de la zone sont marqués par une réduction moyenne journalière de la visibilité inférieure à 1 km. En outre, le pourcentage un peu plus élevé de cette fréquence < 1 km à la station de Matam par rapport aux autres stations s'explique par le fait que celle-ci présente le plus de cas de déflation, notamment des chasse-sables et des tempêtes de poussières qui sont associés à une forte dynamique éolienne, et qui souvent, en raison des conditions litho-pédologiques, entraînent des concentrations élevées en particules, réduisant ainsi la visibilité à cette distance.

Le diagnostic de l'évolution mensuelle et/ou saisonnière de la fréquence de la visibilité réduite du fait de la présence de ces aérosols désertiques nous a permis de détecter le maximum et le minimum des évènements.
Dans les stations du nord du Sénégal, c'est au cœur de la saison sèche que la présence des poussières désertiques réduit au maximum la VH, avec un pic au mois de mars (figure 5). Durant ce mois (au cours de la période 1965-2014), les stations de Matam et Podor ont enregistré une VH en moyenne réduite à moins de 3 km, alors que sur cette même série de 50 ans, elle reste inférieure à 2 km à la station de Saint-Louis. Si nous considérons seulement la visibilité réduite à moins de 5 km, on constate qu'environ 85 % des événements poussiéreux réduisent la VH à cette distance à la station de Saint-Louis. Environ 70 % et 75 % des lithométéores réduisent la VH à moins de 5 km au mois de mars aux stations de Podor et Matam (figure 5).





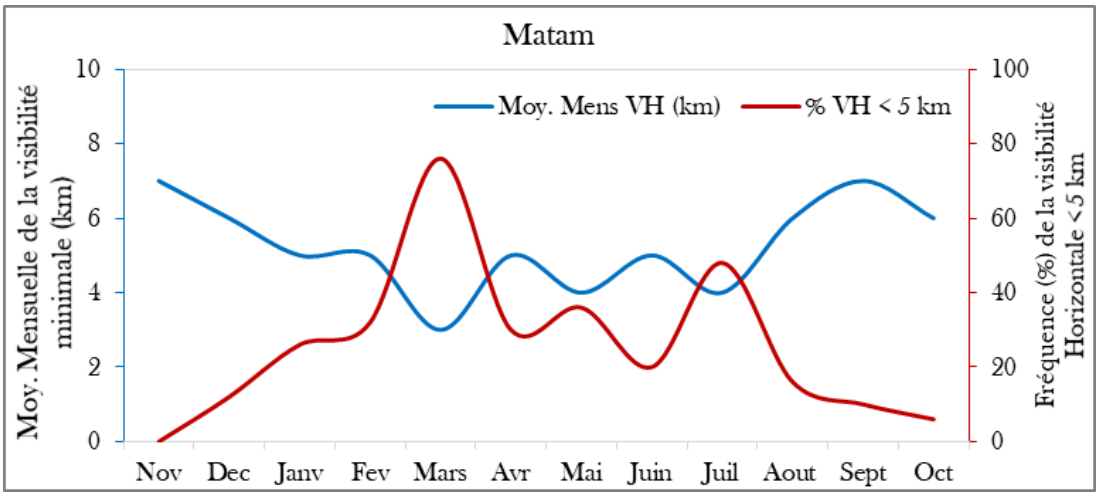


Figure 5. Évolution mensuelle/saisonnière de la VH (km) réduite pour cause de présence de lithométéores et fréquence (%) de la VH < 5 km aux stations Nord du Sénégal.

Monthly/seasonal evolution of horizontal visibility (VH) (km) reduced due to presence of lithometeors and frequency (%) of horizontal visibility (VH) <5 km at stations North of Senegal.

Le maximum de réduction de la visibilité observé au mois de mars est à mettre en relation avec l'émission des zones sources sahélo-sahariennes qui présentent quasiment toutes le maximum de leur activité en cette période de l'année.

La réduction de la VH par les poussières désertiques dans cette partie du pays est minimale de façon générale en pleine saison des pluies. Au mois d'août, au centre et à l'est de cette partie du pays, seul 1 événement de litho-météores sur 10 présente une réduction de visibilité à moins de 5 km. À l'ouest, seuls 2 jours de présence de poussières désertiques sur 10 sont affectés par une visibilité inférieure à 5 km au mois d'août. Ce minimum correspond à la période où la quasi-totalité des zones sources présente une faible émission en particules, du fait qu'elles sont sous contrôle de la pluvio-métrie qui engendre des conditions défavorables à l'arrachement des parti-cules. C'est aussi à cette période de l'année que le front intertropical (FIT) atteint sa position la plus septentrionale et s'oppose à l'avancée des flux de l'harmattan qui sont les porteurs des panaches de poussières émises en zones sources, réduisant ainsi l'arrivée de ces derniers dans les régions sud-sahéliennes et donc au Nord Sénégal.

On comprend ainsi la relation qui existe entre la distance de réduction de la VH par les poussières désertiques et l'importance de la concentration en particules de l'air (figure 6).

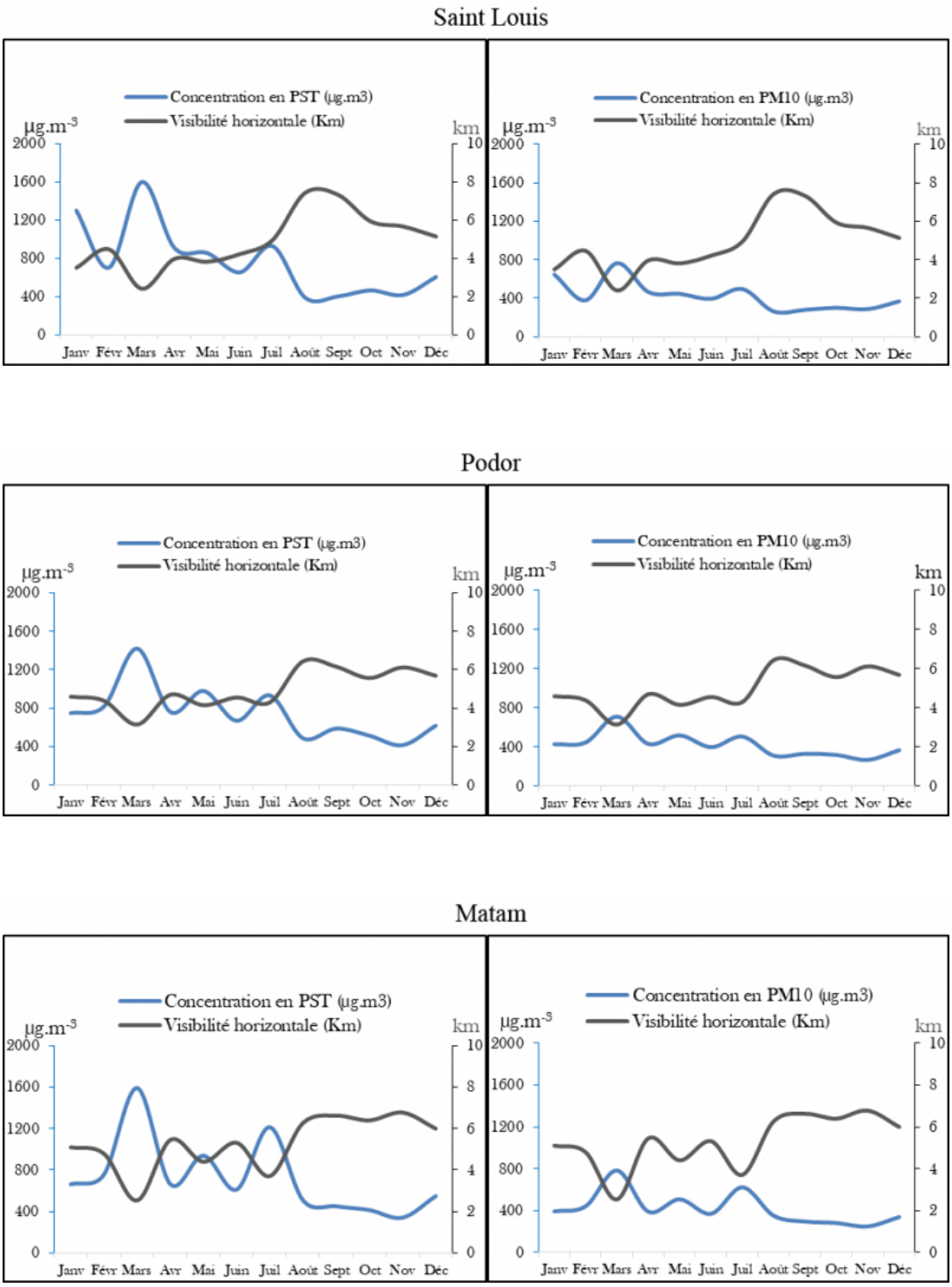


Figure 6. Relation entre VH réduite et concentration en PST (Particules en Suspension Totale) (à gauche) et PM_{10} (à droite), aux stations de Saint-Louis, Podor et Matam (1965-2014).

Relation between reduced horizontal Visibility (VH) and PST (Total Suspension Particles) (left) and PM10 (right) concentration at the stations of Saint-Louis, Podor and Matam (1965-2014).

Cette relation est attestée à la figure 6 où l'on observe qu'au niveau de chaque station considérée, les courbes de concentrations (en PST et en PM_{10}) et de VH suivent toujours des allures opposées. Plus (moins) la concentration en particules est forte, moins (plus) la visibilité est bonne. Le mois de mars qui, comme nous l'avions vu précédemment, est le mois de l'année où la visibilité minimale est en moyenne la plus réduite (< 2 km à la station de Saint-Louis, < 3 km aux stations de Podor et Matam) coïncide parfaitement avec les niveaux de concentrations moyennes mensuelles en PST et en PM_{10} les plus élevés de l'année (respectivement 1597 $\mu g.m^{-3}$ et 766 $\mu g.m^{-3}$ à la station de Saint-Louis, 1421 $\mu g.m^{-3}$ et 711 $\mu g.m^{-3}$ à la station de Podor, 1592 $\mu g.m^{-3}$ et 783 $\mu g.m^{-3}$ à la station de Matam).

Le premier minimum observé au mois d'août, caractérisant le premier mois de l'année (calendrier) où la VH est moins affectée (VH < 7 km à la station de Saint-Louis et < 6 km aux stations de Podor et Matam) correspond au premier minima de concentration en PST et en PM_{10} (respectivement 387 et 264 $\mu g.m^{-3}$ à la station de Saint-Louis, 486 et 312 $\mu g.m^{-3}$ à la station de Podor, 508 et 351 $\mu g.m^{-3}$ à a station de Matam). Les mois de janvier et/ou février et les mois d'avril-mai-juin (visibilité réduite de moins 4 à moins 5 km), qui marquent la situation intermédiaire entre les mois à visibilité fortement réduite et ceux à visibilité faiblement affectée, constituent sans surprise aucune la transition (600-980 $\mu g.m^{-3}$ en PST et 350-520 $\mu g.m^{-3}$ en PM_{10}) entre les mois où les événements poussiéreux sont caractérisés par les plus fortes concentrations en PST et en PM_{10} et ceux où la présence de lithométéores est associée à des concentrations en PST et en PM_{10} les moins fortes de l'année aux stations de l'extrême Nord Sénégal.

En outre, le test de corrélation de Pearson, appliqué aux données de concentrations en PM_{10} et de visibilité minimale, indique que r est égal à 0.90 pour la station de Saint-Louis, à 0.93 pour la station de Podor et à 0.92 pour la station de Matam. Ce résultat confirme parfaitement cette corrélation entre ces deux paramètres.

3.3. Conséquence de la mauvaise visibilité horizontale sur les activités socio-économiques au Nord du Sénégal

14 Aux stations Nord Sénégal, les principales activités socio-économiques fréquemment affectées par la mauvaise VH pour cause de poussières désertiques restent le transport routier et les activités de commerce (figure 7). Pour ces activités de commerce, ce sont les boutiquiers et vendeuses aux marchés qui sont les acteurs les plus concernés.

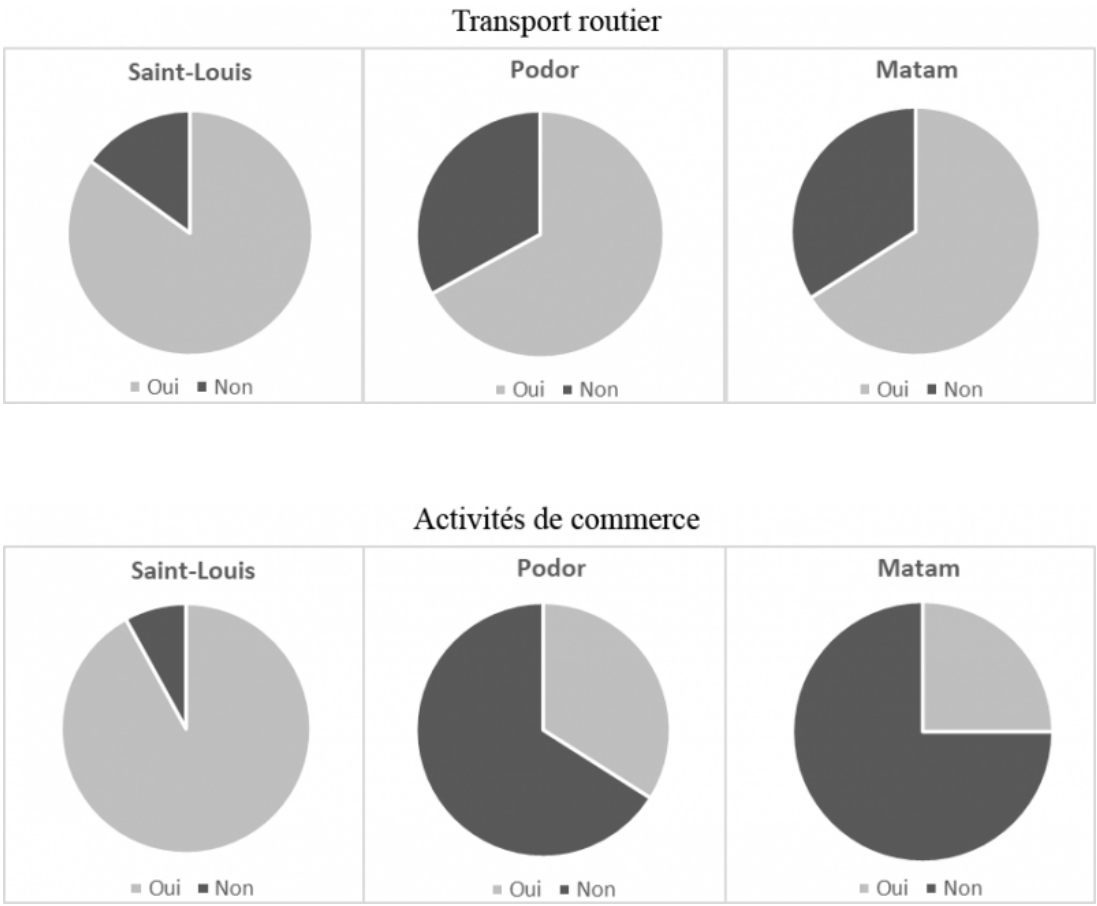
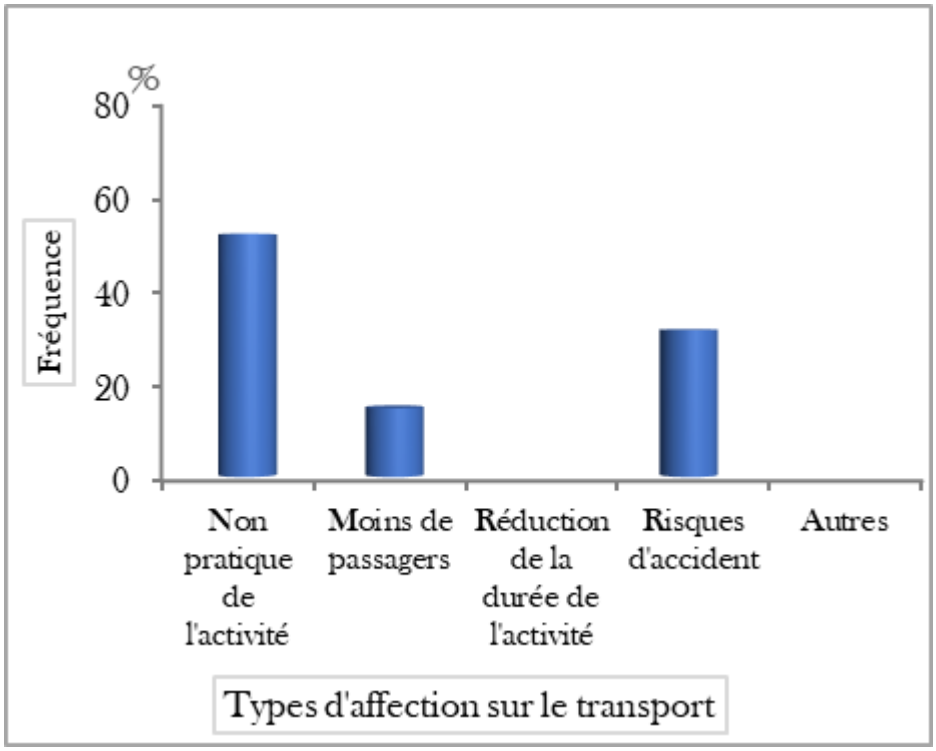


Figure 7. Activités de transport routier et de commerce affectées lors de la réduction de la visibilité par les poussières désertiques.
Road transport and trade activities affected when reducing visibility by desert dust.

La majeure partie des acteurs du transport routier (figure 7) soulignent éprouver d'énormes difficultés de pratique de l'activité en ces jours de très fortes concentrations de poussières rendant ainsi mauvaise la visibilité. Au niveau des différentes stations de la région, 66 à 87 % des transporteurs routiers interrogés affirment que leur activité est fortement affectée lors des épisodes de forte réduction de la visibilité par les lithométéores. En effet, la forte réduction de la VH impose d'énormes difficultés et risques du côté des transporteurs dans la conduite des voitures, alors que les fortes concentrations de poussières, en raison notamment des impacts sanitaires, réduisent fortement le nombre de passagers qui, généralement, choisissent d'attendre le retour à des conditions normales pour effectuer leurs déplacements.

Alors que l'essentiel des commerçants interrogés à Saint-Louis affirment être fortement affectés dans la pratique de leur activité lors de fortes concentrations en poussières, 25 à 34 % des commerçants à Matam et à Podor, notamment boutiquiers et vendeuses aux marchés, notent d'énormes difficultés de pratique et d'écoulement de leurs produits en ces jours où la visibilité horizontale reste très réduite par la présence de poussières désertiques (figure 7). Cette fréquence plus importante des affections à l'ouest (station de Saint-Louis) comparée au reste de la région s'explique par le fait que contrairement au centre (station de Podor) et à l'est (station de Matam) où ces phénomènes ont toujours été fréquents et donc très connus des populations qui ont su s'adapter, à l'ouest, il s'agit plutôt d'événements irréguliers et qui d'ailleurs n'ont connu un essor « considérable » que récemment, constituant alors une véritable problématique d'adaptabilité (Gaye, 2017). En ces situations, certaines vendeuses couvrent leurs légumes et autres produits, alors que d'autres qui, habituellement, étalaient leurs produits à l'extérieur des tentes, hangars ou bâtiments qui servent de marchés, sont obligées de regagner ces locaux pour mener leur activité. En ce qui concerne les boutiquiers, si certains préfèrent attendre le retour à des conditions normales pour ouvrir les portes de leurs boutiques, d'autres par contre choisissent de bâcher la façade de leurs boutiques pour limiter les impacts ou encore ouvrir à moitié les portes de la façade pour réduire l'envahissement des poussières.

En outre, il existe plusieurs types d'affectation du transport routier et des activités de commerce, et ceux-ci restent les mêmes dans toute la région (figure 8). Cependant en termes de fréquence, ces derniers varient selon les stations ouest, centre et est, du fait de la question d'adaptabilité.



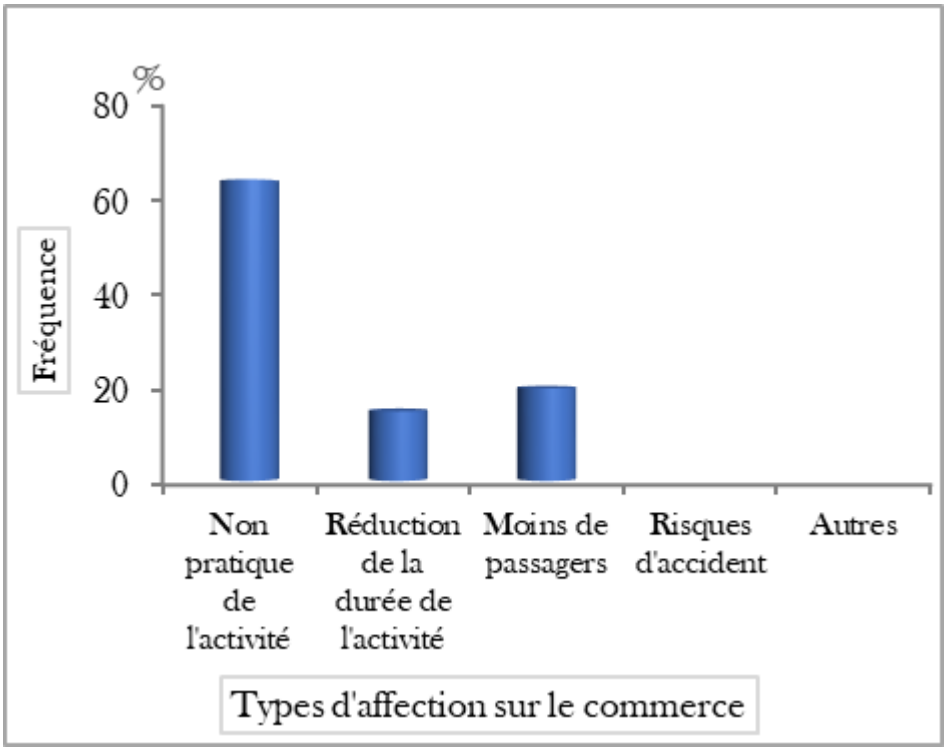


Figure 8. Types d'affectation du transport routier et des activités de commerce lors des jours de mauvaise visibilité due à la présence de poussières désertiques dans l'extrême Nord Sénégal.

Types of allocation of road transport and trade activities during days of poor visibility due to the presence of desert dust in the extreme North Senegal.

La majeure partie des transporteurs routiers interrogés soulignent ne pas pratiquer l'activité à tel niveau de réduction de visibilité par les lithométéores. Si une bonne part de ces derniers avancent des raisons de baisse du nombre de passagers et donc de baisse de revenus, la majeure partie évitent les risques d'accident.
En effet, la teinte jaunâtre imposée par la masse énorme de particules en suspension dans l'air affaiblit la luminosité du jour (photos 1 et 2), ce qui engendre de véritables dangers de circulation routière (accidents liés aux éventuels obstacles des routes, collisions entre véhicules…).

Photo 1. Forte concentration en particules de poussières imposant une teinte jaunâtre et réduisant fortement la visibilité horizontale à Woudourou (Matam) le 15 mars 2016 (cliché : D. Gaye).
High concentration of dust particles imposing a yellowish hue and strongly reducing horizontal visibility in Woudourou (Matam) on March 15, 2016.

Photo 2. Évènement de lithométéores imposant une teinte jaunâtre et réduisant fortement la visibilité horizontale à Saint-Louis le 12 avril 2017 (cliché : D. Gaye).
Event of lithometeores imposing a yellowish hue and strongly reducing the horizontal visibility in Saint-Louis on April 12th, 2017.

Du côté des acteurs du commerce, ils sont fréquemment exposés à l'arrêt des activités, sinon à une réduction de leur durée lors des jours à visibilité fortement réduite. En effet, 65 % des commerçants interrogés affirment arrêter ou ne pas du tout exercer leur commerce lors de tels événements, alors que 15 % soutiennent réduire la durée de l'exercice de leur activité en fonction de la persistance du niveau de concentration. L'arrêt ou la réduction de la durée de l'activité conduit à une baisse de revenu, et a donc un véritable impact économique.

4. Discussion et conclusion

15 L'étude des niveaux de PM_{10} révèle un nombre important d'épisodes de poussières dégradant fortement la qualité de l'air au Nord Sénégal. En outre, quelle que soit la station considérée, environ 80 % des jours lithométéoriques dépassent les normes de qualité de l'air (OMS ou Sn). Ces observations sont similaires aux résultats obtenus au Burkina Faso par Martiny *et al.* (2013). Ces derniers ont mesuré les PM_{10} au Burkina Faso durant une année et ont trouvé que la valeur de 50 $\mu g.m^{-3}$ a été dépassée dans 91 % des cas. Des valeurs similaires à ces mêmes résultats auraient été trouvées ailleurs au Sahel par Marticorena *et al.* (2010). Plus récemment, en 2014, le rapport final de la délégation de l'Union Européenne au Mali révèle que les teneurs de l'air en PM_{10} à Bamako sont plus de 10 fois supérieures aux normes journalières recommandées par l'OMS. Ce rapport succède d'ailleurs aux résultats de Doumbia (2012) qui révélaient des concentrations moyennes journalières à Bamako s'élevant à 504 $\mu g/m^3$. L'ensemble de ces résultats reste parfaitement en phase avec nos observations. Par ailleurs, nous avons trouvé que ces fortes concentrations en particules lithométéoriques affectent fortement la visibilité horizontale dans le Nord Sénégal avec des maximums journaliers et saisonniers respectivement entre 9 et 15 heures, et au cœur de la saison sèche. Le test de corrélation de Pearson appliqué aux données de concentrations en PM_{10} et de visibilité minimale indique que r varie entre 0.90 et 0.93 dans cette première région sahélienne du pays. Ces résultats sont en phase avec les observations de Gac *et al.* (1986) qui ont effectué une analyse statistique de 760 couples de mesures quotidiennes au Sénégal sur les concentrations des brumes sèches et de la visibilité horizontale au sol. Ces auteurs ont trouvé que ces deux paramètres climatiques sont interdépendants et indiquent, pour le meilleur ajustement pour Dakar, un coefficient de corrélation r de 0.97. De pareilles observations ont été faites par D'Almeida (1986) qui, sur plus de 200 observations de visibilité horizontale dans onze stations synoptiques essentiellement réparties au sud du Sahara, a trouvé une relation entre la concentration de poussières en PM_{10} et la visibilité horizontale, avec un coefficient de détermination (r^2) de 0.95.

16 Plus récemment, les résultats de Dahech et Beltrando (2012) et ceux de De Longueville *et al.* (2014) viennent consolider ces observations. Les premiers soulignent qu'au Sud tunisien, les jours de vent de sable engendrent une faible visibilité et un ciel souvent voilé, et observent dans le même sens que cette visibilité est plus réduite en situation de tempête qu'en situation de chasse-sable. Les seconds étudiaient les impacts des poussières désertiques dans le Bénin septentrional et, sans avancer la valeur de la corrélation entre les deux paramètres, soulignaient que ces aérosols présents dans l'atmosphère y diminuaient la visibilité horizontale. Nos résultats sont donc en parfaite adéquation avec l'ensemble de ces observations faites au Sénégal et dans plusieurs stations du Sahara et de la région sahélienne. En outre, la mauvaise visibilité induite par les poussières désertiques affecte à son tour les activités socio-économiques dans le Nord Sénégal, notamment les secteurs du transport routier et du commerce.

17 Cependant, les conséquences économiques de la pollution de l'air sont très inégalement réparties dans les différentes régions du monde (OCDE, 2016). Ceci est d'autant plus vérifié que, contrairement à cette étude, l'essentiel des travaux corrélant mauvaise visibilité et activités socio-économiques se sont le plus penchés sur les conséquences dans le domaine du transport aérien. C'est le cas à Kano (Nord Nigeria) (Adefofalu, 1984), en Mauritanie (Salama *et al.*, 1991), en Californie (Cahill *et al.*, 1996). Plus récemment, Ozer (2001) soulignait dans ce sens la fréquence dans le Sahel des retards, annulations ou encore détournements d'avions sur d'autres aéroports, dus à la visibilité médiocre. Les rares auteurs ayant étudié les impacts de mauvaise visibilité induite par les lithométéores sur le transport routier ont évoqué des risques d'accidents de la route et sont donc en phase avec nos résultats. Ozer (2001) souligne que, durant la saison sèche, les accidents de la route mortels sont extrêmement fréquents dans les pays sahéliens du fait de la mauvaise visibilité lors de lithométéores fortement denses. D'après Burritt et Hyers (1981), les accidents de la route étaient tellement fréquents en Arizona que des mesures d'alerte de risque de lithométéores ont été prises par le *Department of Transportation.* Ces observations confirment les réponses avancées par l'essentiel des transporteurs routiers interrogés dans notre étude. Notons en outre qu'à notre connaissance, aucune étude n'a jusqu'ici

abordé les impacts de mauvaises visibilités horizontales sur les activités de commerce et que par conséquent ce travail serait le premier à traiter cet aspect.

18 Un prochain article sera uniquement consacré aux conséquences socio-économiques de la mauvaise visibilité induite par les lithométéores, en l'élargissant sur d'autres secteurs d'activités susceptibles d'être affectés par de tels évènements de poussières désertiques, et sur d'autres régions du Sahel comparativement au Nord Sénégal. Une autre étude sur les caractéristiques chimiques de ces particules de poussières, notamment les particules fines, est envisagée, ce qui d'ailleurs conduirait à l'autre volet important des impacts des lithométéores, celui des conséquences sanitaires.

BIBLIOGRAPHIE

Adefofalu DO, 1984 : On bioclimatological aspects of Harmattan dust haze in Nigeria, *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioclimatologie*, Série B, 33, 387-404.

Burritt BE, Hyers A, 1981 : Evaluation of Arizona's highway dust warning system, dansPéwé TL (dir.),Desert dust, origin, characteristic, and effect on man, *Geological Society of America*, Special Paper, 186, 281-292. Disponible sur : https://doi.org/10.1130/SPE186-p281

Cahill TA, Gill TE, Reid JS, *et al.*, 1996 : Saltating particles, playa crusts and dust aerosols at Owens (dry) Lake, California, *Earth Surface Processes and Landforms*, 21, 621-639. Disponible sur : http://onlinelibrary.wiley.com/wol1/doi/10.1002/(SICI)1096-9837(199607)21:7%3C621:AID-ESP661%3E3.0.CO;2-E/abstract

Coudé-Gaussen G, 1990 : Les régions-sources de poussières au Sahara, *Sécheresse*, 2, p. 134-141. Disponible sur : http://www.jle.com/fr/revues/sec/e-docs/les_regions_sources_de_poussieres_au_sahara_271381/article.phtml

Dahech S et Beltrando G, 2012 : Le vent de sable dans le sud tunisien, conséquences pour l'homme à Sfax, *La Météorologie, Revue de l'atmosphère et du climat*, 8e série, 79, 40-50. Disponible sur : http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/48512

D'Almeida A, Gaye D, 2016 : Analyse estimative des concentrations en particules de lithométéores au Nord-Sénégal de 1965 à 2013 : étude de cas des stations de Saint-Louis, de Podor et de Matam, *Revue de géographie du laboratoire Leïdi*, 14, 179-200.

D'Almeida GA, 1986 : A Model for Saharan dust transport, *J Climate Appl Meteor*, 25, 903-916. Disponible sur : https://doi.org/10.1175/1520-0450(1986)025<0903 :AMFSDT>2.0.CO ;2

De Longueville F, Henry S, Ozer P, 2014 : Première évaluation des impacts des poussières désertiques sur la santé des enfants en Afrique de l'Ouest : étude de cas dans le Bénin septentrional, XXVII*e* *colloque de l'Association internationale de climatologie*, 536-542.

Délégation de l'Union Européenne au Mali, 2014 : Révision du profil environnemental du Mali, Rapport final, contrat-cadre bénéficiaires 2013-lot n° 6 : Environnement EuropeAid/132633/C/SER/multi.

Doumbia EHT,2012 : Caractérisation physico-chimique de la pollution atmosphérique urbaine en Afrique de l'Ouest et étude d'impact sur la santé, thèse de doctorat, université de Toulouse, laboratoire d'Aérologie, 242 p.

Gac J-Y, Carn M, Diallo MI, *et al.*, 1986 :Corrélation entre brumes sèches et visibilité horizontale au sol à partir de mesures quotidiennes au Sénégal pendant 3 années, note présentée par Georges Millot, *C. R. Acad. Sc. Paris*, Série II, 303, 11, 1025-1027. Disponible sur : http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:23296

Gaye D,2017 : Fréquence des aérosols désertiques dans l'extrême Nord-Sénégal (Stations de Saint-Louis, Podor et Matam) : effets radiatifs, conséquences sur la visibilité horizontale et impacts sanitaires, thèse de doctorat unique de géographie, université Gaston-Berger de Saint-Louis (Sénégal), 385 p.

Laurent B, Marticorena B, Bergametti G, *et al.*, 2008 : Modeling mineral dust emissions from the Sahara desert using new surface properties and soil database, *J. Geophys. Res.*, 113, D14218, doi :10.1029/2007JD009484 (https://doi.org/10.1029/2007jd009484).

Marticorena B et Bergametti G, 1996 : Two-year simulations of seasonal and interannual changes in Saharan dust emissions, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 1921-1924.

Marticorena B, Chatenet B, Rajot JL, *et al.*, 2010 : Temporal variability of mineral dust concentrations over West Africa : analyses of a pluriannual monitoring from the AMMA Sahelian Dust Transect. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 8899–8915. Disponible sur : https://www.atmos-chem-phys.net/10/8899/2010/

Martiny N, Roucou P, Pohl B, *et al.*, 2015 : Définition d'un événement de poussières désertiques au Sahel : apport de nouvelles mesures de PM_{10} au Burkina Faso, XXVIII*e* *colloque de l'Association internationale de climatologie*, Liège, 194-199.

Mokhtari M, 2012 : Amélioration de la prise en compte des aérosols terrigènes dans les modèles atmosphériques à moyenne échelle, thèse de doctorat, université de Toulouse, 185 p.

OCDE, L'Essentiel Stratégique, 2016 : Les conséquences économiques de la pollution de l'air extérieur, Paris, 20 p.

Ozer P, 2001 : Les Lithométéores en région sahélienne, un indicateur climatique de la désertification, GEO-ECO-TROP, *Revue internationale d'écologie et de géographie tropicales*, 24, 327 p.

Salama M, Deconinck JN, Lotfy MF, *et al.*, 1991 : L'ensablement à Nouakchott : exemple de l'aéroport, *Sécheresse*, 2, 101-109. Disponible sur : http://www.jle.

ent_de_nouakchott_exemple_de_laeroport_271176/article.phtml

Schütz L, Rahn KA, 1982 : Trace-element concentrations in erodible soils, *Atmos. Environ.*, 16, 1, 171-176.

RÉSUMÉS

Français

Les lithométéores constituent depuis plusieurs décennies de véritables « types de temps caractéristiques des régions arides et semi-arides » du Sénégal. La région du Nord Sénégal en connaît depuis le courant du dernier demi-siècle (1965-2014) une fréquence importante, avec des épisodes dégradant fortement la qualité de l'air. L'étude des concentrations en particules (PM_{10})obtenues aux différentes stations de la région révèle que, comparativement aux normes définies par l'OMS et à la norme sénégalaise sur la qualité de l'air, respectivement plus de 80 % et 60 à 70 % des d'épisodes de poussières y dégradent fortement la qualité de l'air. Les résultats de cette étude montrent que ces événements de pollutions lithométéoriques affectent véritablement la visibilité horizontale dans cette partie sahélienne du Sénégal. L'application du test de Pearson aux données de concentrations en PM_{10} et de visibilité minimale lors des événements de poussières désertiques indique une très forte corrélation (*r* égal à 0.90 pour la station de Saint-Louis, à 0.93 pour la station de Podor et à 0.92 pour la station de Matam) entre les deux paramètres. L'enquête de vulnérabilité révèle que le secteur du transport routier et les activités de commerce sont à leur tour fréquemment affectés lors des jours à mauvaise visibilité horizontale induite par la présence de lithométéores. Ce qui constitue dès lors de véritables conséquences socio-économiques de ces polluants particulaires au Nord Sénégal.

English

For several decades, lithometeors is "characteristic time's type of arid and semi-arid regions". Over the last half-century (1965-2014), North Senegal experienced a significant frequency with episodes that severely degrade air quality. The study of the PM_{10} *values obtained at the various stations in the region shows that, compared to the standards defined by the WHO and the Senegalese standard on air quality, respectively, more than 80 % and 60 to 70 % of dust episodes severely degrade air quality. The results of this study show that these events of lithometeors pollution really affect the horizontal visibility in this Sahelian part of Senegal. The application of the Pearson test to* PM_{10} *concentration levels data and minimum visibility for desert dust events indicates a very strong correlation (r is 0.9 for the Saint-Louis station, 0.93 for the Podor station and 0.92 for the Matam station) between the two parameters. The vulnerability survey reveals that the road transport sector and trade activities are in turn frequently affected during days with poor horizontal visibility due to the presence of lithometeors. This constitutes a*

genuine socio-economic impact of these particulate pollutants in Northern Senegal.

INDEX

Mots-clés
conséquences socio-économiques, lithométéore, Nord Sénégal, qualité de l'air, visibilité horizontale

Keywords
air quality, horizontal visibility, lithometeor, North Senegal, socio-economic impact

AUTEUR

M. Demba Gaye
Géographe-climatologue, laboratoire Leïdi « Dynamiques des territoires et développement », université Gaston-Berger de Saint-Louis (Sénégal)
gaye.demba (at) ugb.edu.sn
gaye_demba (at) yahoo.fr