

Mesure du dépôt au sol des aérosols désertiques. Une méthode simple de prélèvement : le capteur pyramidal

Didier ORANGE, Jean-Yves GAC, Jean-Luc PROBST et Didier TANRE

Résumé – Une simple cuve pyramidale de plexiglass permet de mesurer le dépôt d'aérosols à l'échelle régionale. Ce capteur pyramidal donne une meilleure estimation du dépôt de poussières au sol que les dispositifs aspirants classiques souvent colmatés dans ces zones arides, où les concentrations en aérosols peuvent être importantes. La hauteur annuelle des dépôts éoliens sur le Cap-Vert est estimée à $70 \mu\text{m}/\text{an}$.

Measurements of Saharan dust deposition. A simple sampling technique: the pyramidal collecting system

Abstract – The collecting system is presented. It is a simple pyramidal receptacle which records Saharan dust deposition at regional scales on a daily basis. Where as the common air-filter sampling system is usually filled-up due to very high aerosol concentrations, our system is proved to be efficient whatever the conditions. The annual thickness of Saharan dust layer over the whole Cape Verde area is estimated at $70 \mu\text{m} \cdot \text{y}^{-1}$.

Abridged English Version – The different sampling methods of atmospheric dust can be classified in two groups according to the two major fields of interest, meteorology and geology. When the meteorologists are concerned with the atmospheric concentration expressed in $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, the geologists and the pedologists are concerned with deposition on the ground expressed in $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$. In this paper, we firstly present the new collecting system to measure the deposition and then compare our results with a classical air filtration technique.

The system is a simple pyramidal receptacle of 40 cm of depth and 0.25 cm^2 of collecting surface. It is located at 5 m above the ground and delivers deposited dust into a collecting bottle when daily washed with distilled water. The samples are hence filtered on $0.45 \mu\text{m}$ pore-size Millipore filters, dried up at 70°C and weighted. This method allows a sampling of only the non-dissolved matter. The dissolved fraction could be obviously analyzed from the filtrate.

Daily measurements of dust deposition were performed in Dakar (Senegal) from 1984 to 1989 and in Mbour, 80 km southwards on the Atlantic coast, from 1986 to 1987. These two stations were located in ORSTOM centers but only the second one performed air filtration measurements from January to May 1986. The two joined data sets are reported in Figure 1 for the five months. The behaviours seem quite similar except some peaks noted by our instrument that the classical ones did not record because of filling-up owing to such high concentrations. By assuming a mean fluid transfer rate of $2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, the total deposition for the five months is estimated equal to $264 \pm 38 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ from the air filter measurements when the pyramidal collecting system gives $285 \pm 29 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$. A linear relation between the 120 available observations gives a regression coefficient equal to 1.06 and a correlation coefficient of 0.79 which is quite significant. Neither technique takes into account the possible remobilization by the wind and consequently the deposition on the ground is overestimated.

Measurements of daily deposition during the 1986 rainy season and the 1987 dry season are reported in Figure 2 for the two sites. The general good agreement confirms the regional

Note présentée par Georges MILLOT.

0764-4450/90/03110167 \$ 2.00 © Académie des Sciences

pattern of the events. If the importance of large events is different at the two locations, they are recorded by both instruments. The larger differences occur during the wet season due to the scavenging process by the rainfall. The order of magnitude of the deposition is almost identical in wet season at the two stations, when in dry season, the Dakar measurements are twice more important. Behaviour of dust deposition is seasonal, it is more important for the first six months of the year, as in the whole of West Africa. But from June to October, during the wet season, Saharan dust deposition is not insignificant: it represents 25% of the total annual flux. The two driest years of the Senegal river, 1983 and 1984, have generated the biggest production of aeolian dust, respectively in 1984 and 1985. The average annual deposition is of $200 \text{ g.m}^{-2}.\text{y}^{-1}$ at Dakar and of $150 \text{ g.m}^{-2}.\text{y}^{-1}$ at Mbour. This difference is assumed the result of human activity which is focused near Dakar, and so increases the remobilization and secondary deposition. According to previous study, the local remobilization of deposited dust is estimated at 40%. So, the averaged annual deposition is of $120 \text{ g.m}^{-2}.\text{y}^{-1}$ over the whole Cape Verde area, which means a thickness of the Saharan dust layer of $70 \mu\text{m}.\text{y}^{-1}$.

In conclusion, the pyramidal collecting system has proved to be efficient whatever the local conditions when classical methods failed for conditions of large dust concentrations. The instrument is rudimentary and cheap; moreover, the sampling protocol is made as simple as possible. These major considerations mean it could be used to complete a large observation network in these major sources of mineral aerosols which are the Sahelian regions. This study also notes the importance of atmospheric dust in the geochemical cycle of natural elements. They influence the chemical quality of rain waters, of soils, of surface waters and their sediments.

I. INTRODUCTION. — Actuellement, les données sur les flux d'aérosols désertiques se présentent sous diverses formes. Pour permettre la comparaison des résultats des différentes équipes, il serait important désormais d'uniformiser la méthode de mesure. En effet, il existe de nombreuses techniques d'échantillonnage, certaines pouvant être très complexes ([1], [2]). Cette grande diversité tient à deux raisons principales : l'étude des lithométéores est une science jeune et il faut du temps pour normaliser les méthodes de prélèvement, mais surtout c'est un domaine qui intéresse deux disciplines scientifiques. Les météorologues s'intéressent aux concentrations de poussières en suspension dans l'atmosphère, alors que les géologues, les pédologues et les agronomes veulent quantifier les dépôts de poussières au sol. Deux types de techniques d'échantillonnage sont donc utilisés. Cependant, étant donné la grande importance que revêtent les poussières atmosphériques sur le fonctionnement des climats et la circulation aérienne, ce sont les météorologues qui ont été les premiers à s'intéresser à ce phénomène; aussi leur méthode de prélèvement est la plus couramment utilisée. Elle consiste à collecter les poussières éoliennes sur filtres millipores par aspiration d'un volume d'air mesuré par compteur, les données sont alors exprimées en microgrammes par mètre cube. Par contre, les techniques mesurant exclusivement les dépôts de poussières au sol utilisent toutes sortes de surfaces naturelles ou artificielles pour piéger les poussières, les données sont alors exprimées en milligrammes par mètre carré [3]. Parmi ces techniques, un appareil simple et facile à confectionner est proposé. Il permettrait une installation rapide et peu onéreuse d'un grand réseau d'observation autour du Sahara, qui est la zone-source principale des aérosols terrigènes à l'échelle mondiale.

II. COMPARAISON DES RÉSULTS OBTENUS PAR DEUX MÉTHODES. — 1. *Présentation des deux méthodes de mesures utilisées.* — Des mesures de dépôt de poussières ont été réalisées par l'ORSTOM de 1984 à 1989 à Dakar et de 1986 à 1987 à Mbour, 80 km au Sud sur la côte atlantique. Ce point marque la limite méridionale du Cap-Vert. Le capteur d'aérosols consiste en une cuve pyramidale renversée de plexiglass, de 40 cm de profondeur avec une surface de réception de $0,25 \text{ m}^2$, placée à 5 m au-dessus du sol. Le capteur est lavé à l'eau distillée quotidiennement et à heure fixe, pour récupérer les poussières déposées dans la cuve. Ensuite au laboratoire, les poussières sont recueillies par filtration sur filtres millipores de $0,45 \text{ }\mu\text{m}$ de porosité puis séchées à 70°C et pesées. Cette méthode ne prend en compte que la fraction insoluble des dépôts atmosphériques secs et humides; pour obtenir des informations sur la fraction soluble, il suffit d'analyser le filtrat.

A Mbour, de janvier à mai 1986, conjointement à une mission C.N.R.S.-C.N.E.S. de mesures d'épaisseur optique de l'atmosphère [4], cet appareil a été couplé avec une pompe aspirante classique de type Millipore, fonctionnant 23 h/24 h de 18 h à 17 h le lendemain [5]. Le volume d'air aspiré à travers un filtre circulaire de 35 mm de diamètre est de l'ordre de $20 \text{ m}^3/\text{jour}$. Les filtres sont pesés après passage à l'étuve, les résultats sont exprimés en microgrammes par mètre cube.

2. *Comparaison des variations journalières enregistrées par les deux types d'appareils.* — La forme des deux courbes d'évolution journalière enregistrées par les deux types d'appareils utilisés à Mbour est sensiblement la même (*fig. 1*). Les différentes pulsations enregistrées par le capteur pyramidal le sont également par le dispositif aspirant. Dans ce dernier système, l'amplitude des pics est moins importante et certains sont écartés. En effet, ce système présente un inconvénient majeur : le colmatage rapide des pores de la membrane filtrante. Ceci entraîne une réduction du volume d'air aspiré dans des proportions indéterminables et donc une saturation de la quantité de poussières mesurée. Ce phénomène explique, par exemple, l'absence de pics de la deuxième moitié d'avril, alors que le capteur pyramidal a enregistré de grandes variations mesurées également à Dakar. Ainsi, le système gravitaire à dispositif pyramidal, malgré son côté rudimentaire, mesure bien le dépôt de poussières se produisant à l'échelle régionale.

3. *Comparaison des quantités de poussières déposés au sol.* — A partir des mesures effectuées par le système aspirant, le flux de dépôt s'exprime par la formule : $\Phi = W_d \cdot C$, où W_d est la vitesse de transfert du fluide vers le bas et C sa concentration mesurée en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les analyses granulométriques ont montré que la taille moyenne des poussières collectées était de l'ordre de 10 à $15 \text{ }\mu\text{m}$ [6]. Pour des aérosols de cette dimension, la vitesse moyenne de transfert oscille autour de 2 cm/s pour un couvert végétal d'herbes hautes et fines, caractéristique d'une zone de savane [7]. Cette valeur permet d'estimer le flux de dépôt à $264 \pm 38 \text{ mg}/\text{m}^2$ sur les 5 mois éprouvés alors que le capteur pyramidal donne une moyenne de $285 \pm 29 \text{ mg}/\text{m}^2$. Ces deux résultats sont concordants. La relation exprimant le dépôt de poussières $F_{p(m)}$ mesuré par le capteur pyramidal en fonction du flux $F_{p(e)}$ estimé à partir des mesures du dispositif aspirant est la suivante : $F_{p(m)} = 1,06 \cdot F_{p(e)}$. Le coefficient de régression linéaire calculé sur 120 observations est très hautement significatif ($r = 0,79$).

Le capteur pyramidal fournit donc une bonne estimation du dépôt de poussières au sol. Il est normal que le système aspirant donne un résultat légèrement inférieur, puisque ce dernier système peut facilement se colmater lors des grands événements d'expulsions de poussières, qui ont cependant une signification régionale puisqu'ils ont été enregistrés

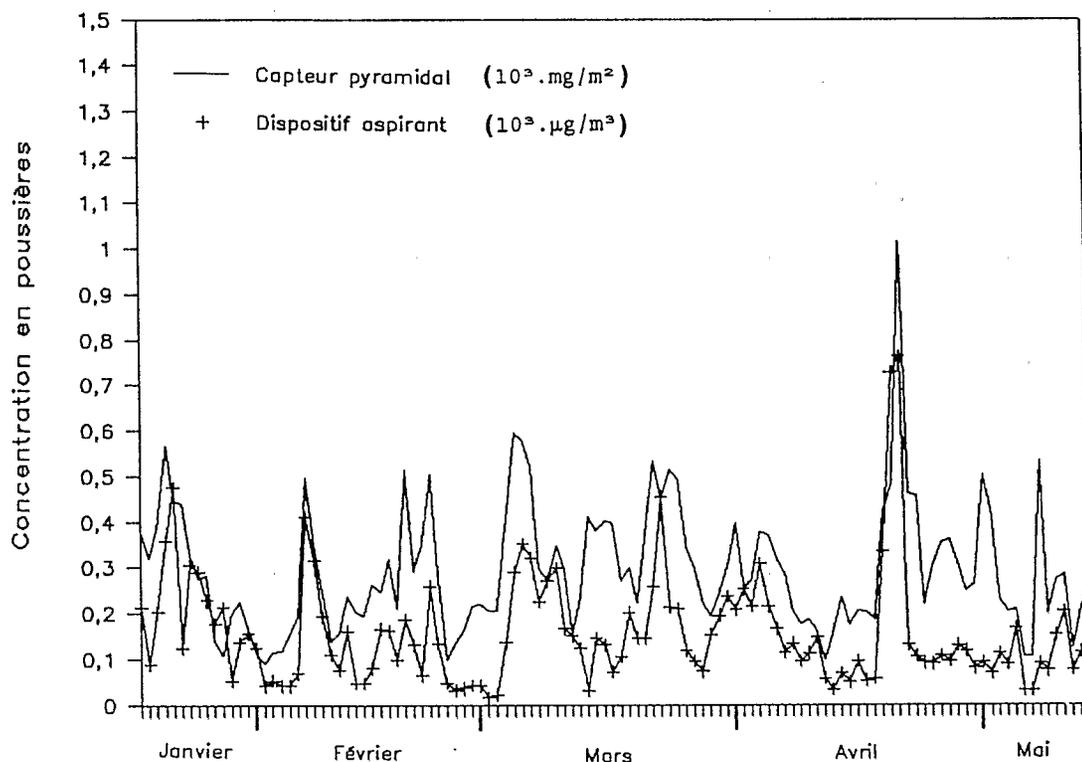


Fig. 1. — Évolutions journalières comparées du dépôt de poussières sahariennes mesuré par le capteur pyramidal (mg/m^2) et de la concentration en poussières par un dispositif aspirant classique ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) à Mbour en 1986.

Fig. 1. — Comparison between daily behaviour of Saharan dust deposition recorded by the pyramidal collecting system (mg/m^2) and dust concentration recorded by a common air-filter system ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) at Mbour in 1986.

à Mbour et à Dakar. Néanmoins, aucun de ces systèmes ne permet d'estimer la quantité de poussières remobilisées. Le dépôt ainsi mesuré est donc surestimé.

III. ESTIMATION DES FLUX DE POUSSIÈRES SAHARIENNES DÉPOSÉS SUR LE CAP-VERT. —

1. *Homogénéité régionale des mesures effectuées par le capteur pyramidal.* — L'évolution journalière des dépôts de poussières est une série de pulsations (fig. 2). Chaque pic enregistré à Dakar l'est également à Mbour, ce phénomène est très net en saison sèche; en saison des pluies, les masses nuageuses perturbent le système et les phénomènes locaux prennent de l'importance, expliquant ainsi les différences de comportement certaines journées entre les deux stations. Les dépôts mesurés aux deux stations sont quasi équivalents durant pratiquement toute l'année, à l'exception des mois de décembre à mars en pleine saison sèche : les dépôts à Dakar sont alors presque deux fois plus importants. Le calage des différents pics enregistrés aux deux stations sur 24 mois confirme que le capteur pyramidal enregistre un phénomène régional global de dépôt de poussières et non des influences locales du site choisi.

2. *Estimation de la hauteur annuelle de dépôt de poussières sur le Cap-Vert.* — Maintenant que les mesures effectuées à l'aide du capteur pyramidal sont validées, les résultats obtenus aux deux stations sont présentés. Comme sur l'ensemble de l'Afrique occidentale ([8] à [11]), les dépôts les plus élevés sont caractéristiques des premiers mois de l'année (de janvier à juin) et les plus faibles s'observent pendant la saison des pluies. A Dakar, la moyenne interannuelle journalière est de $0,54 \text{ g}/\text{m}^2/\text{jour}$, ce qui correspond à un dépôt

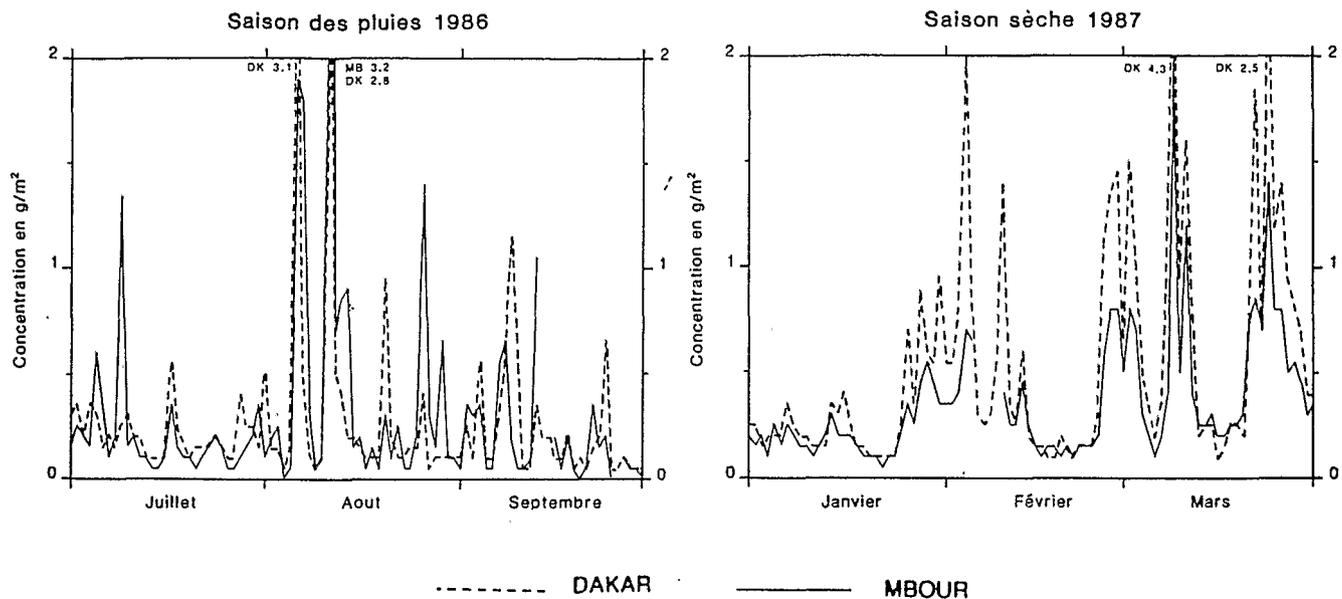


Fig. 2. — Évolutions journalières comparées des dépôts de poussières sahariennes à Dakar et à Mbour enregistrés par le capteur pyramidal en saison des pluies 1986 et saison sèche 1987.

Fig. 2. — Comparison between daily behaviour of Saharan dust deposition at Dakar and at Mbour recorded by pyramidal collecting system during the 1986 rainy season and the 1987 dry season.

annuel de $200 \text{ g/m}^2/\text{an}$. Au milieu de la saison humide, de juillet à septembre, les dépôts de poussières sont de $0,26 \text{ g/m}^2/\text{jour}$; ils ont des valeurs intermédiaires les mois de juin et octobre. Les apports de poussières ont souvent été ignorés durant cette saison humide, ils représentent pourtant, de juin à octobre, 25 % des retombées annuelles. Sur les 6 années de mesures effectuées à Dakar, le dépôt journalier maximal (enregistré le 23 mai 1984) est de $10,6 \text{ g/m}^2$. Les deux cycles hydrologiques les plus secs du fleuve Sénégal (1983 et 1984) ont précédé les 2 années les plus productives en poussières, respectivement 1984 et 1985. Enfin, il existe une corrélation hautement significative entre ces dépôts de poussières et la visibilité horizontale au sol mesurés à Dakar. Ces deux paramètres sont liés par la relation : $D \cdot V^{1,35} = 7,77$ où D est le dépôt de poussières en grammes par mètre carré et V la visibilité en kilomètres ([5], [6], [12]). A Mbour, le dépôt annuel de poussières ($150 \text{ g/m}^2/\text{an}$) est inférieur à celui de Dakar, ce qui peut se justifier par l'influence du facteur anthropique qui doit sensiblement augmenter les phénomènes de remobilisation aux environs de Dakar [13].

Une étude des relations existant entre la vitesse du vent et le dépôt de poussières en milieu sahélien a permis d'estimer le taux de remobilisation moyen annuel à 40 % [14]. Reprenant ce résultat, le dépôt effectif de poussières à Dakar est donc de $120 \text{ g/m}^2/\text{an}$. Finalement pour une densité moyenne de $1,5\text{-}2 \text{ g/cm}^3$, la hauteur annuelle des dépôts éoliens actuels est de $70 \mu\text{m}/\text{an}$ sur l'ensemble du Cap-Vert, ce qui correspond au modèle de Jaenicke [15] qui estime l'épaisseur du dépôt de poussières sur la côte atlantique ouest africaine à $67 \mu\text{m}/\text{an}$. Cette valeur est inférieure à la limite critique pour la formation de loess ($0,5\text{-}1 \text{ mm}$) [16].

IV. CONCLUSION. — La comparaison des résultats acquis par le capteur pyramidal, sur deux stations différentes peu éloignées géographiquement et dans des sites analogues, a montré que ce type d'appareil mesurait un phénomène régional de dépôt de poussières

au sol et non des perturbations locales. D'autre part, la comparaison, sur un même site, des résultats obtenus par le capteur pyramidal et par un dispositif aspirant classique confirme que les pulsations enregistrées par deux méthodes aussi différentes correspondent au phénomène naturel. Enfin, la comparaison de ces données a montré que le capteur pyramidal donnait un bon ordre de grandeur de la quantité de poussières déposées au sol. En tenant compte de la remobilisation, les dépôts éoliens actuels représentent une hauteur annuelle de dépôt de l'ordre de 70 $\mu\text{m}/\text{an}$ sur l'ensemble du Cap-Vert.

Le capteur pyramidal, malgré son côté rudimentaire qui est aussi l'un de ces atouts, semble le mieux adapté aux conditions de terrain difficiles telles que les zones arides, où les concentrations en poussières sont extrêmement variables.

Cette étude souligne également l'importance des aérosols terrigènes dans le cycle géochimique des éléments naturels. Souvent ignorés, ils devraient systématiquement être pris en compte dans tout essai de modélisation des flux de matière. Ils influencent la qualité chimique des pluies, des sols, des eaux de surface et de leurs matières en suspension.

Note remise le 15 mai 1990, acceptée le 25 mai 1990.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] B. STEEN, In: *Saharan dust: mobilization, transport, deposition*, S.C.O.P.E., Rep. n° 14, Morales, 1979, p. 279-286.
- [2] G. T. GOODMAN, M. J. INSKIP, S. SMITH, G. D. R. PARRY et M. A. S. BURTON, In: *Saharan dust: mobilization, transport, deposition*, S.C.O.P.E., Rep. n° 14, Morales, 1979, p. 211-232.
- [3] B. STEEN, in: *Saharan dust: mobilization, transport, deposition*, S.C.O.P.E., Rep. n° 14, Morales, 1979, p. 287-289.
- [4] D. TANRE, C. DEVAUX, M. HERMAN, R. SANTER et J.-Y. GAC, *J. Geophys. Res.*, 93, 1988, p. 14223-14231.
- [5] D. ORANGE, M. CARN, M. CHAUVIN, M. I. DIALLO et J.-Y. GAC, *Contribution à l'étude du phénomène des brumes sèches au Sahel*, ORSTOM, Dakar, 1986, 36 p.
- [6] J.-Y. GAC, M. CARN, M. I. DIALLO, D. ORANGE et D. TANRE, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 303, série II, 1986, p. 1025-1027.
- [7] J. L. DOMERGUE, *Contribution à l'étude des aérosols atmosphériques d'origine naturelle en Afrique de l'Ouest*, Thèse, Toulouse, 1980, 165 p.
- [8] J. M. PROSPERO, R. A. GLACCUM et R. T. NEES, *Nature*, 289, 1981, p. 570-572.
- [9] G. COUDE-GAUSSIN et P. ROGNON, *La Recherche*, 147, 1983, p. 1050-1061.
- [10] G. A. D'ALMEIDA, *J. Climate and Appl. Meteor.*, 25, 1986, p. 903-916.
- [11] I. JANKOWIACK et D. TANRE, *J. Climate*, 1989, 23 p. (in press).
- [12] J.-Y. GAC, D. ORANGE et M. I. DIALLO, *La visibilité au sol à Dakar (Sénégal), recueil de 25 années d'observations (1962-1986)*, rapport ORSTOM, Dakar, 3 tomes, 1987, 382 p.
- [13] K. W. NICHOLSON, *Aim. Environment*, 22, 1988, p. 2639-2651.
- [14] G. H. MCTAINSH, *Nature*, 286, 1980, p. 587-588.
- [15] R. JAENICKE, In: *Saharan dust: mobilization, transport, deposition*, S.C.O.P.E., Rep. n° 14, Morales, 1979, p. 233-242.
- [16] H. TSOAR et K. PYE, *Sedimentology*, 34, 1987, p. 139-153.

D. O. et J.-L. P. : Centre de Géochimie de la Surface,
C.N.R.S., 1, rue Blessig, 67084 Strasbourg Cedex;

J.-Y. G. : Laboratoire de Géologie, ORSTOM, B.P. n° 1386, Dakar, Sénégal;

D. T. : Laboratoire d'Optique atmosphérique, C.N.R.S., 59655 Villeneuve-d'Ascq Cedex.