

volume 2  
95309



## SEMINAIRE IGAC/DEBITS/AFRIQUE

(INSET, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire 5 au 8 décembre 1994)

J. Y. GAC<sup>1</sup>, M. CARN<sup>1</sup>, F.X. COGELS<sup>1</sup>, A. COLY<sup>2</sup>, A. NIANG<sup>2</sup>, D. ORANGE<sup>3</sup>

### RECONNAISSANCE CHIMIQUE DES EAUX DE PLUIE ET IMPORTANCE DES DEPOTS DE LITHOMETEORES AU SENEGAL AU COURS DE LA PERIODE 1984-1994

#### Résumé

Avant 1981, il n'existait que très peu de données publiées sur les compositions chimique et isotopique des eaux de pluie au Sénégal. Les études engagées sur les eaux souterraines et sur celles des trois grandes rivières du pays (Sénégal, Gambie et Casamance) souffraient de cette méconnaissance du "signal d'entrée" chimique et isotopique.

Une étude a été entreprise au début de la saison des pluies 1981 et poursuivie au cours des "hivernages" 1982, 83, et 84. Lors de la première campagne, les précipitations journalières ont été prélevées en huit stations réparties sur l'ensemble du Sénégal. En 1982, tous les événements pluvieux ont donné lieu à une collection, globalement à M'Bour et de manière fractionnée à Dakar Hann, grâce à un dispositif de flacons en série. Des protocoles d'échantillonnage identiques ont été mis en place à Bakel et Goulombou en 1983 et de nouveau à Dakar en 1984, et en 1985.

Outre l'aspect marquage initial isotopique et chimique des précipitations en zone sahélienne et en bordure du littoral atlantique, le grand nombre d'échantillons disponibles livrent des informations sur l'origine et les conditions de distillation des masses de vapeur d'eau et sur l'importance relative de la réévaporation en cours de chute.

Avec le développement actuel des programmes pour la protection de l'environnement et de l'atmosphère, un effort particulier a été déployé depuis une dizaine d'années pour évaluer le transport et le dépôt des lithométéores. En effet, les poussières font partie des grands cycles d'échanges de matière entre la lithosphère, l'hydrosphère, la biosphère et l'atmosphère.

Leurs sources sont les régions arides et semi-arides qui couvrent près de 30 % de la surface des continents. Les deux plus importants foyers sont le désert d'Asie centrale et le Sahara (RHAN *et al.*, 1979). La plus grande partie des expulsions de poussières sahariennes par la façade atlantique se produit entre le Cap-Blanc en Mauritanie et le nord du Sénégal (OLIVA *et al.*, 1983).

Après une description sommaire du phénomène et du protocole d'échantillonnage à l'aide d'un capteur pyramidal inédit, cette contribution à l'étude des lithométéores se propose de faire le point de toutes les observations journalières effectuées de 1984 à 1994, de préciser ensuite la nature des constituants puis d'établir la relation entre les dépôts et la visibilité horizontale au sol.

<sup>1</sup> ORSTOM, B.P. 1386, Dakar (Sénégal)

<sup>2</sup> Département de Géographie Physique, Fac. Des Lettres et Sces. Humaines, UCAD, Dakar, (Sénégal)

<sup>3</sup> ORSTOM, B.P. 5045, Montpellier (France)



Fonds Documentaire ORSTOM  
Cote : 6 \* 16713 Ex : 1

## I. LES PRECIPITATIONS HUMIDES

### 1. Stations de mesures et protocoles de prélèvement

A deux exceptions près, les prélèvements proviennent des sites d'études engagées par l'ORSTOM sur le comportement hydrogéochimique des grands bassins versants sahéliens. Il a ainsi été possible de couvrir l'ensemble des principales zones climatiques du Sénégal à partir de 8 stations : Saint-Louis, Richard-Toll, Dakar, M'Bour, Bakel, Tambacounda, Diafilon et Kédougou (Fig. 1)

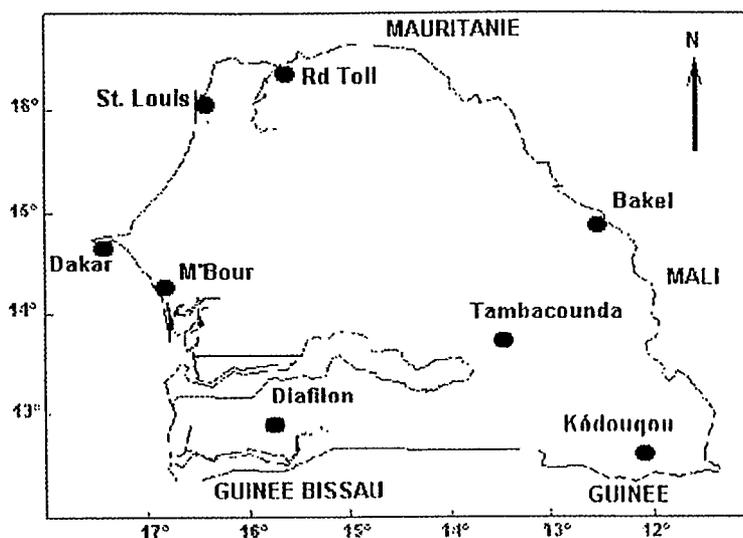


Fig. 1 - Position géographique des stations

Des entonnoirs à col étroit, surmontant des flacons teintés, ont fait office de pluvio-récepteurs. Les échantillons de chaque averse ont été temporairement conservés dans de volumineux récipients où une fine couche d'huile de paraffine interdisait l'évaporation. Les collecteurs ont été rincés à l'eau distillée après chaque averse et les prélèvements filtrés avant entreposage.

Pour ce qui est de la chimie, les échantillons sont essentiellement représentatifs des précipitations humides (*rain-out* et *wash-out* de la littérature anglo-saxonne). Les prélèvements concernent essentiellement les mois de juillet et d'août ainsi que septembre à Tambacounda, Bakel et Richard Toll. A la fin de la saison des pluies, des fractions aliquotes des eaux ont été transmises pour analyse au Centre de Sédimentologie et Géochimie de la Surface de Strasbourg (méthodes d'analyse décrites par KREMPP, 1982) et au laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie isotopique de l'Université de Paris-Sud.

### 2. Evolution de la composition chimique des pluies

Les analyses correspondent, dans la plupart des cas à des moyennes mensuelles par suite du cumul des échantillons. Les tableaux I et II regroupent le corpus analytique et la composition chimique moyenne aux différentes stations (moyennes pondérées par l'importance relative des précipitations pour les différents mois). L'examen de ces tableaux laisse apparaître des différences de teneur ioniques, parfois importantes, entre les stations.

Tableau I

Composition chimique mensuelle (en mg/l) des pluies au Sénégal  
(TRAVI et al. 1987, 1993)

Stations continentales Mois	Tambacounda			Kédougou		Diafilon		Bakel		
	Jt	A	S	Jt	A	Jt	A	Jt	A	S
pH	6.30	6.40	5.96	6.40	6.29	5.96	6.14	6.68	6.89	5.98
cond ( $\mu$ S)	10.90	22.50	9.20	23.60	20.50	8.60	9.90	20.20	22.30	40.80
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.04	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.09
Na <sup>+</sup>	0.55	0.90	0.53	0.87	0.41	0.55	0.48	0.76	0.53	2.83
K <sup>+</sup>	0.16	0.31	0.27	0.59	0.39	0.23	0.66	0.35	0.27	0.86
Mg <sup>2+</sup>	0.15	0.63	0.07	0.19	0.15	0.10	0.15	0.15	0.17	0.49
Ca <sup>2+</sup>	1.04	2.16	0.56	2.92	2.68	0.60	0.40	2.44	3.04	2.96
HCO <sup>-</sup>	3.54	11.47	0.43	9.33	7.75	1.83	2.26	7.20	8.54	9.45
Cl <sup>-3</sup>	0.74	0.67	0.96	1.85	1.35	0.75	0.82	1.38	1.49	5.33
NO <sup>-2</sup>	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
NO <sup>-3</sup>	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.37	0.70
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.77	0.49	1.15	0.39	0.78	0.67	0.67	1.06	0.58	1.82
H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	0.77	2.21	0.19	0.77	0.48	0.77	0.57	0.67	0.67	1.02
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /Cl <sup>-</sup>	1.04	0.73	1.20	0.21	0.58	0.89	0.82	0.77	0.39	0.34
<b>Total</b>	<b>7.88</b>	<b>19.00</b>	<b>4.30</b>	<b>17.05</b>	<b>14.13</b>	<b>5.64</b>	<b>6.15</b>	<b>14.15</b>	<b>15.73</b>	<b>24.97</b>

Stations côtières Mois	Mbour		Dakar		Saint Louis		R.	Toll	
	Jt	A	Jt	A	Jt	A	Jt	A	S
pH	6.72	6.25	3.56	n.d.	5.26	3.75	5.54	6.87	6.85
cond ( $\mu$ S)	54.20	20.50	130	n.d.	29.00	74.20	20.50	67.60	53.20
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.05	0.02	0.05	0.29	0.02	0.40	0.02	1.17	0.43
Na <sup>+</sup>	5.15	2.19	3.91	3.13	1.59	0.90	1.10	6.44	5.57
K <sup>+</sup>	0.70	0.31	1.02	0.39	0.35	0.90	0.43	0.86	0.63
Mg <sup>2+</sup>	0.63	0.27	0.56	0.32	0.29	0.22	0.24	0.85	0.27
Ca <sup>2+</sup>	3.20	0.80	3.12	1.12	1.68	1.44	1.28	2.52	2.64
HCO <sup>-</sup>	7.81	2.93	4.58	(+H <sup>+</sup> )	0.61(+H <sup>+</sup> )	3.54(+H <sup>+</sup> )	0.67	11.71	12.57
Cl <sup>-3</sup>	8.40	3.20	17.29	-	4.12	1.78	2.13	8.09	4.47
NO <sup>-2</sup>	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
NO <sup>-3</sup>	0.07	0.07	0.07	0.07	3.35	13.02	2.79	0.62	0.62
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	4.51	1.63	5.09	5.09	1.25	2.40	1.15	7.39	2.21
H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	0.67	0.19	1.25	0.67	0.48	0.48	0.48	0.86	0.67
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /Cl <sup>-</sup>	0.54	0.51	0.29	-	0.30	1.35	0.54	0.91	0.49
<b>Total</b>	<b>31.24</b>	<b>11.66</b>	<b>36.99</b>	<b>-</b>	<b>13.79</b>	<b>25.13</b>	<b>10.34</b>	<b>40.86</b>	<b>30.13</b>

L'origine des différents composants minéraux solubles des précipitations a souvent été discutée ainsi que le fractionnement chimique lors de la formation des aérosols marins (GORHAM 1955, 1957, 1961; CHESELET et al. 1972; MATHIEU 1976).

La *minéralisation globale* : elle est représentée ici par la conductivité et la somme anions-cations comprises respectivement entre 8,6 et 130  $\mu$ S/cm et 0,13 et 0,92 méq/l. Elle décroît de l'océan vers l'intérieur des terres et d'une manière un peu moins nette vers le sud. A l'exception des stations les plus méridionales (Diafilon, Kédougou) qui correspondent à la zone des pluies continues, la répartition mensuelle des retombées salines est irrégulière. Ceci rejoint les observations de MATHIEU (1971) sur la Côte d'Ivoire où les pluies de tornade montrent des résistivités très variables.

Tableau II

Composition chimique moyenne pondérée (en mg/l) des pluies du Sénégal aux stations continentales et côtières

Stations	Continentales				Côtières			
	Kédougou	Bakel	Tamba	Diafilon	Mbour	Dakar	St. Louis	R. Roll
$\text{NH}_4^+$	0.02	0.03	0.04	0.02	0.03	0.22	0.23	0.03
$\text{Na}^+$	0.57	0.85	0.73	0.51	3.01	3.36	1.07	6.04
$\text{K}^+$	0.46	0.36	0.24	0.47	0.42	0.57	0.67	0.75
$\text{Ca}^{2+}$	2.76	2.85	1.58	0.48	1.46	1.70	1.43	2.50
$\text{Mg}^{2+}$	0.18	0.20	0.39	0.13	0.37	0.39	0.24	0.50
$\text{HCO}_3^-$	8.29	8.22	7.43	2.07	4.28	-	2.21	12.11
$\text{Cl}^-$	1.52	1.88	0.72	0.79	4.64	-	2.26	6.42
$\text{NO}_3^-$	0.07	0.24	0.07	0.07	0.07	0.07	8.40	0.07
$\text{SO}_4^{2-}$	0.64	0.87	0.66	0.67	2.42	5.09	1.84	5.01
$\text{H}_4\text{SiO}_4$	0.58	0.71	1.47	0.69	0.32	0.84	0.48	0.77
Total	15.09	16.21	13.33	5.90	17.02	34.11	18.83	35.16

Par ailleurs, aucune relation n'a pu être établie entre la minéralisation et la hauteur de précipitation mensuelle ou le nombre des averses.

Les ions *sodium et chlorures* : les concentrations en sodium varient de 0,41 à 6,44 mg/l. Cet élément représente le cation dominant à Richard Toll, Dakar, Saint-Louis, M'Bour et Diafilon, donc au voisinage de la côte; il s'associe le plus souvent aux minéralisations très élevées.

On sait qu'une partie importante des ions sodium des précipitations provient de la surface des océans (JUNGE et WERBY, 1957). On peut donc les associer aux ions chlorures qui, en l'absence de pollution, proviennent des océans (JUNGE et GUSTAFSON, 1957). Les concentrations en Chlore varient de 0,5 à 8,4 mg/l, parallèlement à celles du sodium et représentent l'anion dominant aux stations côtières et à Diafilon.

On admet généralement que le rapport Cl/Na des aérosols et des précipitations sur le littoral est voisin de celui de l'eau de mer (CHESSELET et al., 1972; SASSEVILLE et LACHANCE, 1981) et que sa diminution est liée à l'apport de sodium par les éléments d'origine continentale. Au Sénégal, ce rapport est plus faible que dans l'eau de mer à M'Bour, Richard-Toll, Tambacounda et Diafilon, peu différent à Bakel et Saint-Louis, et plus fort à Dakar et Kédougou. On n'observe donc pas de décroissance nette du rapport Cl/Na lorsqu'on s'éloigne de l'océan.

L'ion *calcium* : contrairement à la distribution de Na et Cl, les teneurs en calcium sont assez homogènes sur l'ensemble du Sénégal. Les variations les plus fortes se manifestent souvent d'un mois à l'autre à une même station. Les teneurs varient de 0,4 à 3,2 mg/l et Ca est le cation dominant dans les précipitations de l'intérieur du pays. Il trouve alors son origine dans l'entraînement de particules carbonatées des sols qui représentent la plus grande partie de la fraction soluble des poussières (GAC, 1985).

L'ion *magnésium* : sa concentration est en général fortement tributaire des apports marins. Les teneurs, relativement faibles, varient de 0,014 à 0,85 mg/l. Les rapports Mg/Na sont très voisins de celui de l'eau de mer pour les stations côtières; ils augmentent parfois assez fortement à l'intérieur des terres où leur caractère essentiel est la grande variabilité d'un mois à l'autre.

L'ion *sulfate* : en l'absence de forte pollution industrielle, l'origine est essentiellement marine et on observe en fait les plus fortes concentrations près de la côte. Toutefois dès que l'on s'éloigne du littoral, la distribution des sulfates météoriques devient erratique. le rapport pondéral  $\text{SO}_4/\text{Cl}$  est toujours supérieur à celui de l'eau de mer (0,14). Cela correspond au phénomène d'enrichissement en ion sulfate qui intervient lors du passage eau de mer-aérosols (MATHIEU, 1976) et se maintient ensuite au cours des précipitations successives.

L'ion *potassium* : à l'image de ce qui a été observé par ailleurs, les eaux de pluies au Sénégal sont peu chargées en potassium (0,15 à 1,88 mg/l) et la répartition ne semble obéir à aucun déterminisme géographique ou saisonnier.

Les ions *nitrate et ammonium* : les concentrations en ces éléments sont faibles et souvent inférieures aux limites de détection (0,07 mg/l pour les nitrates et 0,02 mg/l pour l'ammonium). Les valeurs plus élevées relevées à Richard Toll semblent devoir être reliées aux activités industrielles de la Compagnie Sucrière Sénégalaise.

Le *pH* : les valeurs s'échelonnent de 3,56 à 7,04 mais ne présentent pas une grande signification dans la mesure où l'analyse n'a pas été effectuée in situ et dans l'instant.

L'évolution d'ensemble de la physico-chimie des eaux de pluie en fonction de l'origine des éléments apparaît, dans le temps et dans l'espace complexe et parfois inattendue :

- si de manière classique, le sodium, le chlore, le magnésium et les sulfates sont plus concentrés près du littoral, le rapport Cl/Na ne subit pas de diminution nette en domaine continental et s'inscrit à des valeurs souvent différentes de celle de l'eau de mer.

- les teneurs relatives en calcium n'augmentent pas de manière significative.

L'absence de dépendance nette apparaît également dans la faiblesse des coefficients de corrélation entre les éléments. Cela peut être dû à la nature même du régime climatique intertropical qui délimite des zones fluctuantes, à précipitations d'origine différente.

D'une manière générale, les valeurs moyennes pondérées enregistrées au Sénégal ne présentent pas de caractère exceptionnel.

### 3. Composition isotopique et genèse des précipitations

Les pluies ont été recueillies à un pas de temps très court grâce à un dispositif de flaconnage en série. Cent vingt trois échantillons, correspondant à 28 averses d'intensité variable et d'une durée comprise entre une dizaine de minutes et trois heures, ont pu être ainsi collectés et analysés (Oxygène 18 et deutérium).

L'analyse détaillée des données permet de retenir, principalement, les observations suivantes :

- les teneurs en  $O^{18}$  s'échelonnent de -1 à -11,2 ‰, avec une valeur moyenne pondérée de -4,75 ‰,

- il n'existe pas de corrélation intensité des précipitations et isotopes lourds, mais pour les très faibles pluies, les eaux météoriques sont fortement enrichies, traduisant ainsi l'influence de l'évaporation,

- l'évaporation en cours de chute est surtout liée aux taux d'humidité,

- les épisodes pluvieux à teneurs extrêmes en isotopes lourds correspondent à des conditions aérologiques bien précises et sont étroitement liés à la direction générale des vents. Ainsi, certains épisodes sont clairement marqués par la vapeur océanique issue d'un premier stade de condensation ce qui est en accord avec les fortes teneurs en chlorures et avec les valeurs du rapport Cl/SO<sub>4</sub>. En fin d'hivernage, lors du reflux de la mousson et de la descente de la ZITC, les pluies s'enrichissent en isotopes lourds sous l'effet d'une condensation à basse altitude, et l'évaporation associée aux vents de Nord et de Nord Est se fait nettement sentir.

- enfin, au coeur de la saison des pluies, les averses laissent apparaître des eaux exceptionnellement appauvries en isotopes lourds. Bien qu'un appauvrissement à la suite d'un recyclage de vapeur le long des lignes de grain ne puisse être exclu, l'hypothèse de l'intervention de facteurs extratropicaux, déjà envisagée par certains climatologues (LEROUX, 1988) est à envisager.

## II. LE PHENOMENE DES BRUMES SECHES, LES POUSSIERS ATMOSPHERIQUES

### 1. Description du phénomène des brumes sèches

Les directions principales d'expulsion de poussières au-dessus de l'Afrique de l'Ouest dépendent de la saison considérée. En hiver boréal, la situation anticyclonique sur le continent conduit à des vents d'Est très marqués au nord du 10<sup>ème</sup> parallèle, à NE plus au sud et à une subsidence basse qui dépasse rarement 1.000m d'altitude où sont bloqués les aérosols. En été boréal la circulation générale des aérosols (Fig. 2) est soumise à des mouvements ascendants verticaux et souvent tourbillonnaires dans la zone du Front Inter Tropical (FIT). Enfin, au passage du littoral, les observations indiquent que les conditions de transport dépendent à la fois des saisons et des directions suivies par les poussières.

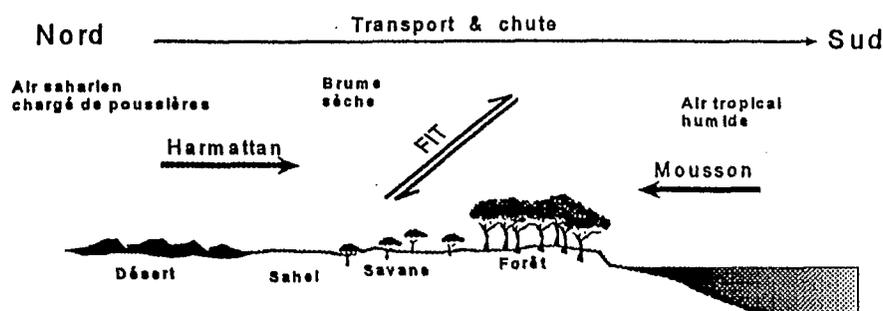


Fig. 2 - Schéma de circulation des poussières atmosphériques

Le "phénomène poussière" n'existe que par la convergence de deux facteurs : la présence d'un stock de particules très fines potentiellement mobilisables et celle d'un vent suffisamment fort pour les soulever et les transporter. L'environnement désertique est naturellement particulièrement favorable à cette convergence mais, d'un part, tous les substrats ne sont pas également aptes à libérer ces particules fines et, d'autre part, le vent n'y montre pas partout la même compétence. Une fois mobilisées, les poussières se déplacent en suspension plus ou moins loin vers les marges du Sahara et au-delà (COUDE-GAUSEN, 1991).

### 2. Protocole d'échantillonnage des poussières éoliennes

Il existe deux types de techniques d'échantillonnage des aérosols particulaires, selon que l'on s'intéresse aux poussières en suspension (système aspirant) ou à la fraction sédimentée (collecteur gravitaire).

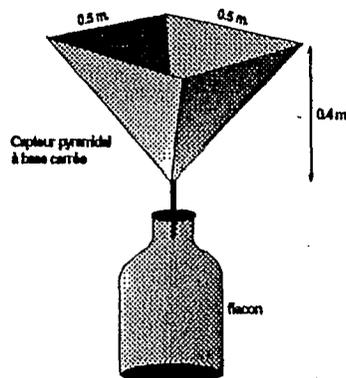


Fig. 3 - Schéma du capteur pyramidal

Le capteur d'aérosols utilisé au laboratoire de l'ORSTOM de Dakar, placé à 5 mètres au dessus du sol, consiste en une cuve pyramidale renversée en plexiglass, de 40 cm. de hauteur, avec une base carrée de 0,25m<sup>2</sup> (Fig. 3). La cavité réceptrice est lavée à l'eau distillée, chaque jour vers 07 h 00 TU. Les poussières sont ensuite recueillies au laboratoire sur filtre millipore de 0,45  $\mu$ m de porosité, puis séchées à 70°C et pesées. Les données sont exprimées en g/m<sup>2</sup>/jour.

Cette méthode d'échantillonnage ne prend naturellement en compte que la fraction insoluble ou peu soluble des dépôts. Pour obtenir des informations sur la fraction soluble il convient d'analyser également le filtrat ou encore de procéder à de simples mesures de conductivité qui permettent de situer l'ordre de grandeur de la minéralisation des dépôts humides (GAC et CARN, 1986).

Une étude comparative entre ce système gravitaire et un appareillage de mesure par aspiration ( $20 \text{ m}^3/\text{jour}$ ) des poussières en suspension, sur filtre millipore de 35 mm de diamètre, a été réalisée au centre ORSTOM de M'Bour de janvier à mai 1986. Les résultats obtenus par les deux méthodes sont concordants (ORANGE *et al.*, 1990; ORANGE, 1990). La relation exprimant le dépôt de poussières  $F_{p_m}$  mesuré par le capteur en fonction du flux  $F_{p_e}$  estimé à partir du dispositif aspirant est la suivante:  $F_{p_m} = 1.06 F_{p_e}$ .

Le coefficient de régression linéaire calculé sur 120 observations est significatif ( $r = 0.79$ ) mais faible puisque le rapport des variances entre les deux capteurs n'est que de 64%. Ceci peut s'expliquer par le fait que le système aspirant intéresse toutes les particules qui entrent dans son champ d'attraction y compris celles très fines qui ne sédimentent pas, tandis que le capteur pyramidal récupère seulement les particules qui tombent et dont certaines peuvent ensuite être remobilisées par le vent.

Deux stations permanentes de collecte des aérosols ont été mises en place au Sénégal : Dakar dans la presqu'île du cap Vert et N'Gnith sur la rive occidentale du lac de Guiers. Ce transect de direction NE coïncide avec la direction des vents dominants porteurs de poussières sahariennes. Des mesures plus ponctuelles ont également eût lieu à Nouakchott en Mauritanie, à Mbour, Pété, Bakel et Kédougou au Sénégal (Fig. 4).

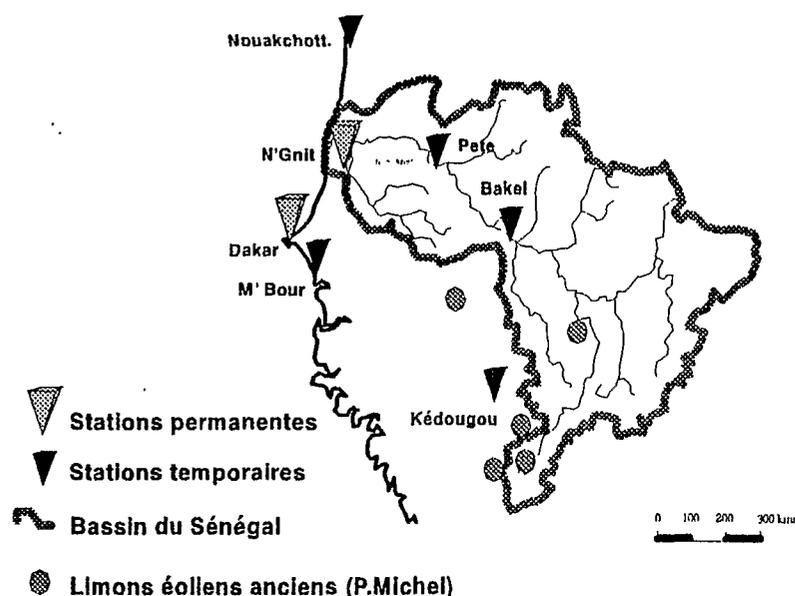


Fig. 4 - Sites d'échantillonnage des poussières éoliennes

### 3. L'enregistrement des poussières éoliennes à Dakar de 1984 à 1994 et à Ngnith de 1987 à 1993

#### a) Importance des aérosols sur la presqu'île du Cap Vert

Sur la presqu'île du Cap Vert du Sénégal les plus importants dépôts de poussières sont observés pendant les premiers mois de l'année ( de janvier à juin) et les plus faibles pendant la saison des pluies (Tableau III et Fig. 5).

Tableau III

Dépôts moyens mensuel et annuel de poussières sur le Cap Vert  
(en  $g/m^2/jour$ )

Mois	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	Moy.
J	1.03	0.88	0.89	0.30	0.93	0.36	0.58	0.27	0.27	0.61	0.57	0.61
F	1.62	1.53	0.54	0.52	0.87	0.86	0.37	0.67	0.35	0.38	0.50	0.75
M	1.11	0.93	1.16	0.85	0.66	0.60	0.71	0.67	0.82	0.78	0.41	0.79
A	0.65	1.10	0.56	0.96	0.42	0.65	0.43	0.38	0.65	0.78	0.86	0.68
M	1.17	0.70	0.50	1.18	0.53	0.72	0.43	0.41	0.62	0.73	0.39	0.67
J	nd	0.93	0.52	0.43	0.52	0.80	0.48	0.42	0.78	0.54	0.52	0.59
J	nd	0.29	0.21	0.39	0.22	0.22	0.21	0.56	0.15	0.19	0.15	0.27
A	nd	0.14	0.39	0.29	0.16	0.13	0.16	0.12	0.13	0.10	0.18	0.19
S	nd	0.29	0.22	0.22	0.15	0.16	0.13	0.22	0.16	0.19	0.07	0.19
O	nd	0.38	0.48	0.37	0.18	0.15	0.16	0.18	0.29	0.15	0.12	0.27
N	0.46	0.32	0.35	0.18	0.17	0.16	0.21	0.19	0.33	0.28	nd	0.27
D	0.66	0.47	0.40	0.37	0.22	0.25	0.53	0.21	0.24	0.29	nd	0.37
An.	0.78	0.66	0.52	0.51	0.42	0.42	0.37	0.36	0.40	0.42	0.38	0.47
J-J <sup>1</sup>	nd	1.01	0.70	0.71	0.66	0.68	0.50	0.47	0.58	0.63	0.54	0.66
J-D <sup>2</sup>	nd	0.32	0.34	0.31	0.18	0.16	0.24	0.25	0.22	0.20	nd	0.26
Max.	10.6	6.95	4.58	4.35	3.53	4.38	3.78	4.65	4.14	5.64	4.23	-
Min.	0.11	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03	0.01	0.03	0.04	0.05	0.02	-

(nd) non déterminée, (1) premier semestre, (2) deuxième semestre

A Dakar, la moyenne interannuelle de 1984 à 1993 est de  $0.47 g/m^2/jour$ , ce qui correspond à un dépôt annuel de près de  $175 g/m^2$ . Au coeur de la saison des pluies, de juillet à septembre, les dépôts de lithométéores se réduisent à  $0.22 g/m^2/jour$ ; ils ont des valeurs intermédiaires durant les mois de juin et d'octobre. Les apports de poussières ont souvent été négligés durant la saison des pluies alors qu'ils représentent, de juin à octobre, 22% des retombées annuelles.

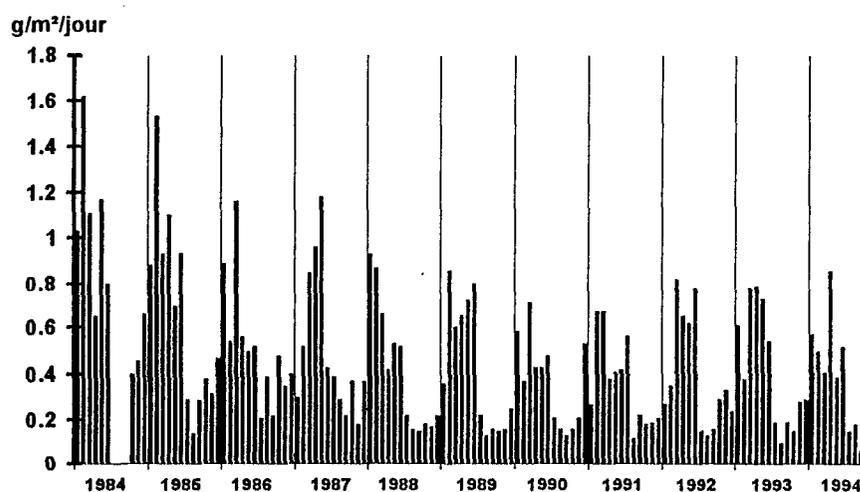


Fig. 5 - Dépôts moyens mensuels de poussières ( $g/m^2/jour$ )  
(station de Dakar d'octobre 1984 à octobre 1994)

Sur les 10 années d'observations à Dakar le dépôt journalier maximum a été enregistré le 23 mai 1984 avec  $10,6 g/m^2/jour$ .

Le cumul mensuel du nombre de jours de brumes sèches correspondant à un dépôt sec supérieur à la moyenne interannuelle ( $0,5 \text{ g/m}^2/\text{jour}$ ) permet également de constater l'importance des dépôts de poussières au cours du premier semestre de l'année (Fig. 6). Les plus fortes fréquences de lithométéores sont observées pendant le mois de mars et ceci quelle que soit l'importance de l'événement.

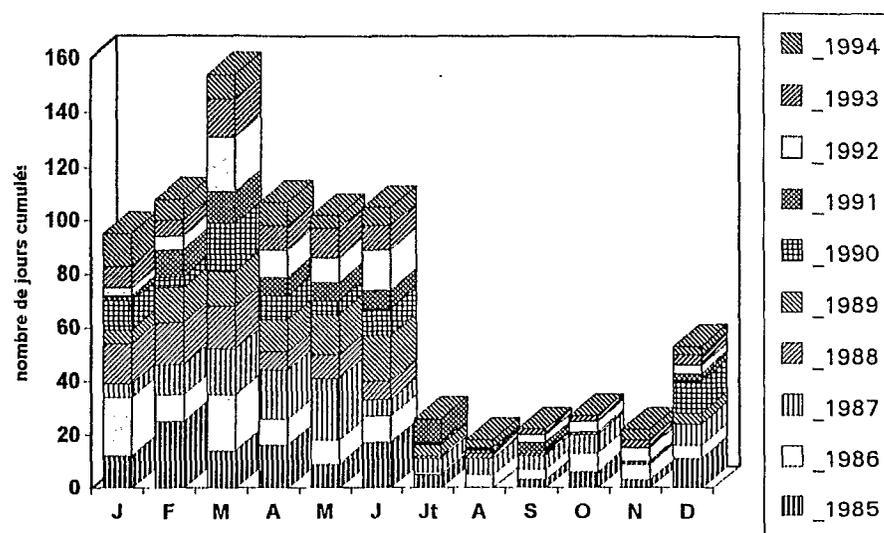


Fig. 6 - Nombre de jours mensuels cumulés où les concentrations en lithométéores ont été supérieures à  $0,5 \text{ g/m}^2/\text{j}$

Cette évolution mensuelle est à replacer dans le contexte général des situations météorologiques : le soulèvement des sables et donc la naissance des lithométéores seraient, d'un point de vue quantitatif, davantage associés à des perturbations d'origine tempérée de type invasions polaires (OLIVA *et al.*, 1983) relativement fréquentes en hiver boréal, qu'à la migration de la ZITC (zone intertropicale de convergence) au cours de l'été boréal.

La figure 7 montre la réduction progressive et continue des dépôts de poussières sur la région de Dakar depuis le début de l'échantillonnage systématique entrepris en 1984. Cette tendance va dans le sens des observations faites par TUCKER *et al.* (1991) sur les oscillations de l'isohyète 200 mm pour la période 1980 à 1990. S'appuyant sur une méthode par télédétection, de suivi de l'état de la biomasse, et après examen de plus de 4500 scènes des satellites à orbites polaires de la série NOAA, ces auteurs ont conclu, à l'encontre des idées jusqu'à présent admises, à un rétrécissement du désert saharien depuis 1984, et donc à une réduction des zones sources de poussières. Ce constat viendrait aussi étonnamment confirmer les hypothèses avancées par FAURE et GAC (1981) et GAC et FAURE (1987) sur la réduction de la sécheresse au Sahel.

On ne peut néanmoins réduire à cette seule explication la diminution des brumes sèches sur la région de Dakar depuis 1984. D'autres causes tout aussi satisfaisantes peuvent être invoquées telles que les variations de la circulation dans les basses couches au cours de cette période, ou encore, plus simplement l'influence de facteurs locaux sur la proportion, dans les échantillons, de poussières et sables d'origine proche. On note cependant que les deux cycles hydrologiques les plus déficitaires du siècle du fleuve Sénégal (1983 et 1984) ont précédé les deux années de plus fortes productions en lithométéores, respectivement 1984 et 1985 (Fig. 8).

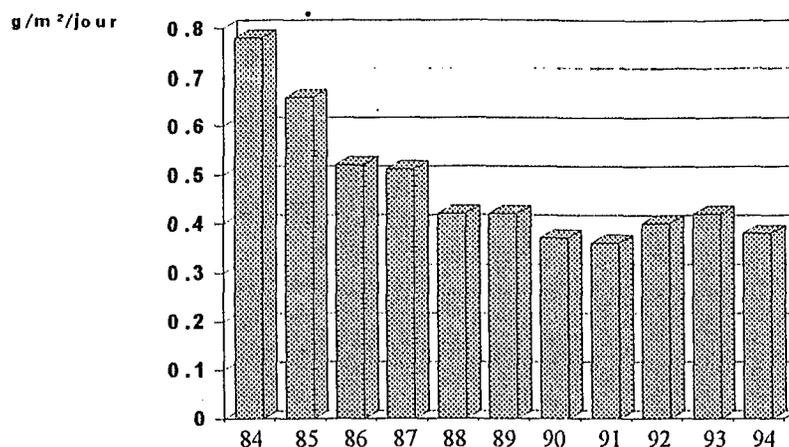


Fig. 7 - Evolution des dépôts moyens annuels (exprimés en  $g/m^2/jour$ ) de 1984 à 1994.

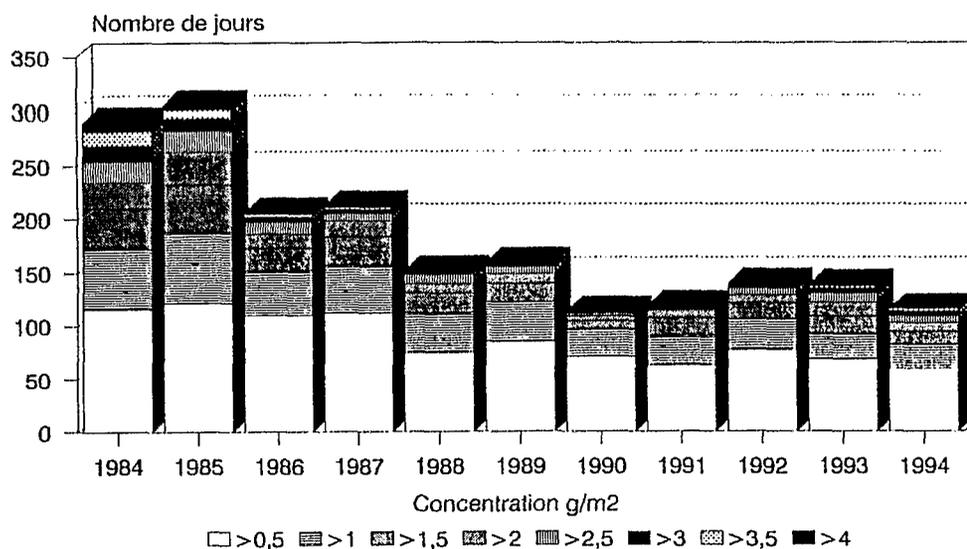


Fig. 8 - Fréquence annuelle des brumes sèches de 1984 à 1994

#### b) Sédimentation éolienne sur le lac de Guiers

L'importance de la sédimentation éolienne sur le lac de Guiers peut désormais être estimée à partir des observations réalisées, depuis 1987, à la station de N'Gnith située sur sa rive occidentale. Cette apport de poussières sahariennes contribue, au même titre que les alluvions du fleuve, à la sédimentation qui s'organise dans la dépression lacustre.

Les retombées sèches mensuelles et annuelles à N'Gnith sont indiquées dans le tableau IV. L'évolution, au cours du temps, de l'importance des dépôts est illustrée par la figure 9.

Pour la période d'observation de juin 1987 à décembre 1993 le dépôt moyen à N'Gnith s'élève à 0,48 g/m<sup>2</sup>/jour ce qui correspond à des retombées sèches au sol de l'ordre de 170 g/an. La comparaison avec Dakar de 1988 à 1993 indique une différence de 20 % entre les deux sites (0,40 g/m<sup>2</sup>/jour à Dakar). Entre ces deux stations distantes, de plus de 200 km, la décantation moyenne serait de l'ordre de 1 % tous les 10 km. Ces pertes peuvent être plus importantes puisqu'il existe des possibilités de réalimentation sur le parcours (cuvette du N'diaël, phosphates de Taiba...). Ces nouvelles sources et leur contribution devraient être perceptibles dans la composition chimique des dépôts.

*En ce qui concerne la sédimentation éolienne dans le lac de Guiers, il faut tenir compte du fait qu'il s'agit d'un récepteur humide et que des reprises par le vent y sont incertaines. Les capteurs secs sous estiment les retombées réelles sur le lac : une simulation dans un capteur humide a montré que les dépôts sur un plan d'eau étaient 4 fois supérieurs à ceux qui arrivent au sol (GAC et TRAVI, 1984).*

A titre d'exemple, les sédiments éoliens "captés" par la réserve lacustre pendant les cinq dernières années, en tenant compte de ce rapport de 4 seraient en moyenne de 100.000 à 150.000 tonnes/an c'est à dire de l'ordre de grandeur des apports d'alluvions issus de l'érosion des sols du haut bassin, des berges de la vallée et acheminés par le fleuve Sénégal vers le lac.

Tableau IV

Dépôts moyens mensuel et annuel de poussières à N'Gnith (en g/m<sup>2</sup>/jour)

Mois	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	Moy.	Dakar (88/93)
J	nd	0.81	0.45	0.65	0.37	0.31	0.73	0.55	0.50
F	nd	0.88	1.05	0.47	0.54	0.44	0.41	0.64	0.58
M	nd	0.84	0.52	0.83	0.48	0.78	0.67	0.69	0.71
A	nd	0.49	0.57	0.48	0.37	0.46	0.60	0.50	0.56
M	nd	0.46	0.36	0.46	0.43	0.74	0.93	0.56	0.57
J	nd	0.65	0.73	0.90	0.46	0.61	0.91	0.71	0.59
J	0.42	0.43	0.22	0.45	0.81	0.44	0.76	0.50	0.26
A	0.46	0.07	0.12	0.27	0.23	0.44	0.37	0.28	0.13
S	0.45	0.16	0.16	0.21	0.48	0.26	0.41	0.30	0.17
O	0.66	0.20	0.18	0.25	0.23	0.32	0.20	0.29	0.19
N	0.21	0.18	0.27	0.30	0.19	0.57	0.33	0.29	0.22
D	0.69	0.30	0.35	0.58	0.26	0.26	0.35	0.40	0.29
Année	-	0.46	0.42	0.49	0.40	0.51	0.56	0.48	0.40
J-J <sup>1</sup>	nd	0.69	0.62	0.63	0.44	0.56	0.71	0.61	0.59
J-D <sup>2</sup>	0.48	0.22	0.22	0.34	0.37	0.38	0.40	0.34	0.21
Max.	7.55	3.30	5.05	3.62	4.90	2.42	3.03	-	-
Min.	0.02	0.01	0.01	0.05	0.05	0.06	0.06	-	-

(nd) non déterminée, (1) premier semestre, (2) deuxième semestre

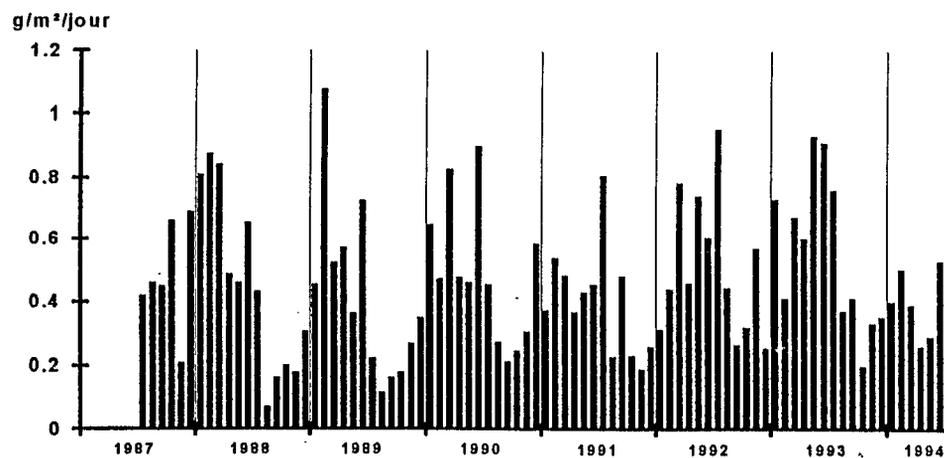


Fig. 9 - Sédimentation éolienne à N'Gnith ( $\text{g/m}^2/\text{jour}$ ) de 1987 à 1994

L'évolution mensuelle est identique à celle observée sur la presqu'île du Cap Vert : retombées maximales au cours des premiers mois de l'année ( $0,61 \text{ g/m}^2/\text{jour}$ ) et atténuation du phénomène de juillet à décembre ( $0,34 \text{ g/m}^2/\text{jour}$ ). Les événements les plus notables se produisent en général en mars et juin.

La recherche d'un gradient Nord-Sud a été testée au pas de temps mensuel entre les stations de Dakar et de N'Gnith pour la période allant de juillet 1987 à juin 1994 (Fig. 10). La corrélation est significative (coefficient de corrélation de 0,79). La relation est plus remarquable au cours du premier semestre lors des phénomènes de brumes sèches les plus denses.

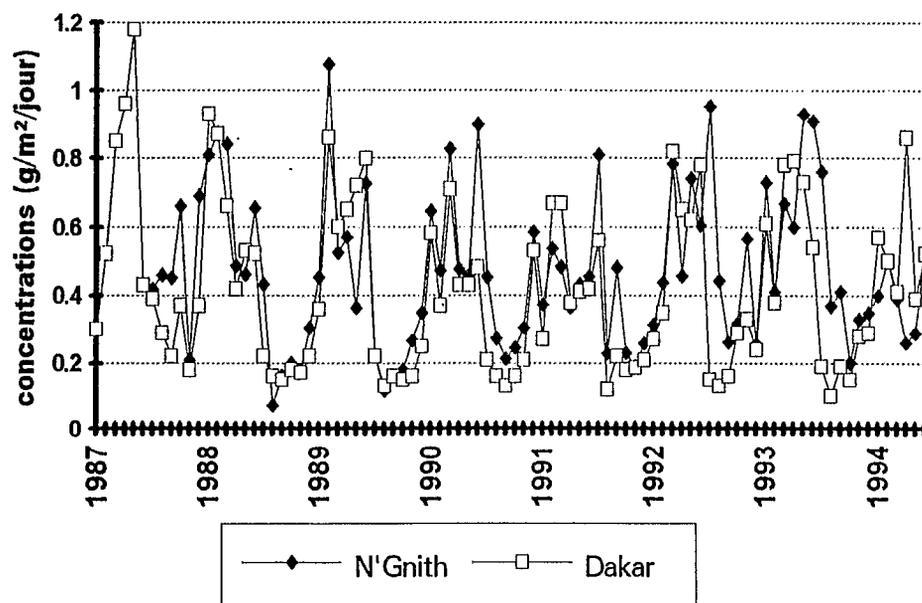


Fig. 10 - Corrélation entre Dakar et N'Gnith ( $C_d = 0,808 C_n + 0,014$ )  
(valeurs mensuelles de juillet 87 à juin 1994)

#### 4. La nature des dépôts secs

Le protocole d'échantillonnage et de filtration précédemment décrit permet l'entreposage hebdomadaire des dépôts. La moitié du stock recueilli a été conservé pour des analyses ultérieures plus fines. L'autre partie a été regroupée par mois afin de préciser la nature minéralogique, chimique et minéralogique des poussières.

##### a) La taille des particules d'origine saharienne

Les analyses granulométriques effectuées sur les échantillons prélevés à Dakar montre que les poussières atmosphériques ont un diamètre moyen de 10-15  $\mu\text{m}$ ; leur composition granulométrique moyenne, est la suivante:

Argiles ( $\varnothing \leq 2\mu\text{m}$ .)	6.5%
Limons fins et moyens ( $2 < \varnothing < 50\mu\text{m}$ )	91.0%
Limons grossiers et sables ( $\varnothing > 50\mu\text{m}$ .)	2.5%

##### b) La composition chimique des brumes sèches

Les résultats de l'analyse chimique des poussières atmosphériques récoltées à Dakar et N'Gnith en 1990, 1991 et 1992 sont indiqués dans les tableaux V et VI (éléments majeurs) et dans le tableau VII (éléments à l'état de traces). Les valeurs mensuelles ont été regroupées par trimestre.

Tableau V

Composition chimique des poussières éoliennes collectées à Dakar pour la période 1990-1992 (en % d'oxydes).

Période	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>
1990										
J-M <sup>1</sup>	61.5	11.6	5.80	2.04	2.68	1.25	0.81	0.84	0.35	12.70
A-J <sup>2</sup>	62.8	10.6	6.50	1.84	2.73	1.19	0.86	0.78	0.36	12.03
J-S <sup>3</sup>	54.3	10.1	5.86	1.57	2.71	1.25	0.72	0.71	0.51	21.97
O-D <sup>4</sup>	58.9	11.1	7.44	1.66	1.78	1.14	0.70	0.79	0.46	15.79
Année	59.4	10.9	6.40	1.78	2.48	1.21	0.77	0.78	0.42	15.62
1991										
J-M	61.9	11.6	6.23	1.96	2.27	1.28	0.81	0.81	0.32	11.74
A-J	62.3	11.3	6.27	1.87	2.40	1.25	0.80	0.78	0.32	11.86
J-S	59.0	10.6	5.13	1.80	1.80	1.26	0.77	0.76	0.35	17.35
O-D	55.5	10.2	7.80	1.32	2.27	0.97	0.58	0.74	0.65	19.25
Année	59.7	10.9	6.36	1.74	2.19	1.19	0.74	0.77	0.41	15.05
1992										
J-M	61.1	10.6	8.53	1.56	2.53	1.37	0.67	0.86	0.46	13.01
A-J	67.5	9.9	6.40	1.87	1.73	1.33	0.86	0.81	0.27	9.16
J-S	57.6	9.8	6.37	1.57	2.50	1.42	0.69	0.82	0.54	19.39
O-D	62.7	10.6	6.93	1.72	2.13	1.42	0.74	0.85	0.38	12.73
Année	62.2	10.2	7.06	1.68	2.22	1.39	0.74	0.83	0.41	13.57
Moyenne	60.40	10.70	6.61	1.73	2.30	1.26	0.75	0.79	0.41	14.75

(1) janvier à mars, (2) avril à juin (3) juillet à septembre, (4) octobre à décembre

Les compositions chimiques trimestrielles et annuelles des poussières sont données en teneurs pondérales (les calculs ont en effet été menés en tenant compte des concentrations d'aérosols par mois, puis par trimestre). La comparaison des teneurs en éléments majeurs, entre les deux sites, permet de mettre en évidence :

- un enrichissement important, à Dakar, en calcium (+ 180 %) et en phosphate (+ 173 %) à corréler sans doute au transit sur le N'Diaël et le gisement phosphaté de Taïba,
- une augmentation très marquée de la teneur en eau (+ 89 %) et du fer (+ 55 %). Rappelons que la teneur en eau ou perte au feu après calcination regroupe : toutes les matières organiques qui brûlent, l'eau de constitution des minéraux argileux et une partie de la décomposition (perte de CO<sub>2</sub>) de la calcite (44 %) et de la dolomite (48 %),
- des teneurs identiques en magnésium, titane et aluminium,
- un appauvrissement en potassium (20 %) en sodium (- 18 %) et en silice (-14 %). La diminution des teneurs en silice est vraisemblablement liée à la chute des particules de quartz sur le parcours.

La comparaison avec la composition moyenne de la croûte terrestre (limitée à la discontinuité de Mohorovicic) indique que les poussières sont enrichies en eau de constitution et en silice et appauvries pour tous les autres éléments.

Tableau VI

Composition chimique des poussières éoliennes collectées à N'Gnith pour la période 1990-1992 (en % d'oxydes).

Période	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O*
1990										
J-M <sup>1</sup>	69.3	12.4	4.17	2.43	0.91	1.32	1.02	0.90	0.13	7.25
A-J <sup>2</sup>	71.0	11.3	3.82	2.31	0.88	1.37	1.03	0.83	0.17	7.03
J-S <sup>3</sup>	69.3	10.1	3.34	1.95	0.94	1.13	0.83	0.73	0.18	11.19
O-D <sup>4</sup>	67.7	11.7	3.97	2.23	0.88	1.25	0.94	0.83	0.15	10.19
Année	69.3	11.4	3.83	2.23	0.90	1.27	0.96	0.82	0.16	8.92
1991										
J-M	69.3	12.3	4.09	2.41	0.88	1.34	0.98	0.93	0.17	7.31
A-J	71.5	11.1	4.03	2.35	0.97	1.31	0.98	0.71	0.12	6.69
J-S	72.0	10.2	3.50	2.10	0.67	1.05	0.88	0.73	0.14	8.41
O-N	70.2	10.6	3.60	2.15	0.64	1.07	0.93	0.70	0.13	9.79
Année	70.0	11.3	3.81	2.25	0.79	1.19	0.94	0.77	0.14	8.05
1992										
J-M	69.5	11.9	5.03	2.13	0.90	1.66	0.87	0.88	0.13	6.40
A-J	73.3	11.1	4.33	2.06	0.80	1.36	0.88	0.85	0.12	5.64
J-S	73.3	9.9	4.00	1.89	0.63	1.14	0.81	0.79	0.15	6.98
O-N	69.9	11.3	4.60	2.09	0.67	1.39	0.89	0.82	0.14	6.77
Année	71.5	11.0	4.49	2.04	0.75	1.39	0.86	0.83	0.14	6.45
Moyenne	70.5	11.2	4.04	2.17	0.82	1.28	0.92	0.81	0.15	7.81
M. (Dakar)	60.4	10.7	6.61	1.73	2.30	1.26	0.75	0.79	0.41	14.75
Croûte Terrestre	59.1	15.2	7.00	3.11	5.10	3.45	3.75	1.03	0.24	1.30

(1) janvier à mars, (2) avril à juin (3) juillet à septembre, (4) octobre à décembre

Tableau VII

Spectre chimique moyen des poussières éoliennes collectées à Dakar et Ngnith( éléments traces en ppb) pour la période 1990-1992.

Station	Dakar				Ngnith				Croûte terrestre	
	Année	1990	1991	1992	Moy.	1990	1991	1992		Moy.
Sr		228	236	215	226	115	116	106	113	375
Ba		519	534	510	521	529	531	474	511	425
V		131	147	127	133	73	76	73	74	135
Ni		77	66	41	62	87	44	64	65	75
Co		19	7	6	11	15	9	8	11	25
Cr		141	136	126	135	79	81	68	76	100
Zn		847	359	313	506	147	181	151	160	70
Cu		153	123	102	126	42	71	36	50	55
Sc		11	11	11	11	10	10	10	10	22
Y		34	31	30	31	32	30	28	30	33
Zr		368	362	379	370	449	449	402	432	165
Mn		434	423	456	438	471	443	428	444	950

Les différences au niveau des marqueurs à l'état de traces est remarquable au niveau du zinc (Zn), du strontium (Sr) du vanadium, du chrome (Cr), du cuivre (Cu) qui ont des teneurs nettement plus élevées à Dakar.

En revanche les aérosols recueillis à proximité du lac de Guiers ont des concentrations plus élevées en zirconium (Zr) en liaison sans doute avec la présence de particules de zircon.

Le corpus analytique montre que l'éloignement des zones sources n'introduit pas de différences significatives au niveau des concentrations en baryum (Ba), en nickel (Ni), en cobalt (Co), en scandium (Sc), en yttrium et en manganèse (Mn). Ceci laisserait supposer que les matériaux qui contiennent ces éléments sont de petite taille et qu'ils ne décantent pas rapidement (exemple : les minéraux argileux).

La comparaison entre les éléments constitutifs de la croûte terrestre et les poussières sahariennes montre que ces dernières sont enrichies en baryum, en chrome, en zinc, en cuivre et en zirconium. L'appauvrissement concerne, le strontium, le cobalt, le scandium, le cobalt et surtout le manganèse. Les teneurs sont du même ordre de grandeur pour le vanadium, le nickel et l'yttrium.

### c) Composition minéralogique

Du point de vue minéralogique, on observe :

- une prédominance du quartz ( plus de 50 % de l'échantillon); il apparaît nettement plus abondant à N'Gnith ce qui confirme les différences de teneurs en silice.
- la présence constante de minéraux phylliteux inversement plus abondants dans le site Sud.

Les différents auteurs (CHESTER *et al.*, 1971; PROSPERO *et al.*, 1981; PAQUET *et al.* 1984) qui ont réalisés des études sur la minéralogie des poussières éoliennes de l'Afrique de l'Ouest, s'accordent pour donner la répartition suivante des diverses fractions argileuses: illite (57%), kaolinite (23%), les 20% restants se partageant entre la chlorite et la smectite ; l'abondance relative de ces deux minéraux est fonction de la zone source et de la distance parcourue.

Au Sénégal la fraction argileuse est constituée pour l'essentiel de kaolinite, d'illite, de muscovite, d'édifices interstratifiés (10-14 A°) : les minéraux gonflants du type smectite sont plus rares.

Les minéraux secondaires sont par ordre d'importance : les feldspaths (certains échantillons ont quand même révélés des teneurs de 18 %), la calcite, la dolomie, la goethite et plus rarement l'halite et certaines amphiboles.. Il faut noter également la présence de minéraux lourds titanifères tels que l'anatase et le rutile.

Cette répartition minéralogique confirme le spectre chimique des aérosols.

## 5. La visibilité horizontale à l'aéroport de Dakar Yoff

La Visibilité Horizontale au Sol (VHS) est la distance horizontale maximale à laquelle un observateur peut identifier un repère dans la direction où l'observation est la moins bonne. L'information disponible sur les visibilités horaires couvre actuellement une période de 30 années, de 1962 à 1991.

L'étude des visibilités constitue l'un des volets importants des recherches entreprises pour mieux identifier les causes, les mécanismes et les effets de la sécheresse qui, depuis bientôt deux décennies affecte les régions du Sahel.

La visibilité est perturbée essentiellement par des aérosols qui se répartissent en deux catégories: les lithométéores ou poussières terrigènes (qui sont par ordre de granulométrie moyenne croissante: les brumes sèches, les brumes de sables et les chasses-sable) et les hydrométéores (brumes, brouillards et pluies).

En ce qui concerne les lithométéores, les brumes sèches représentent plus des 2/3 des événements de poussières relevés à Dakar ( le taux varie de 54 % en janvier à 100% en juillet); les brumes de sable représentent 28% et les chasses-sable seulement 4%.

Les troubles atmosphériques les plus fréquents et les plus intenses sont observés en décembre, janvier, avril et octobre, ce qui tend à confirmer que la présence de noyaux anticycloniques issus d'invasions polaires en hiver (boréal) et le passage du FIT en été, demeurent les principaux agents de production des lithométéores. On peut d'ailleurs suivre la trace au sol de l'équateur météorologique par l'arrivée aux stations de réception des fortes concentrations de poussières.

A l'opposé des lithométéores, les hydrométéores sont intervenues dans la réduction de visibilité surtout au cours de la première décennie de la période d'observation, de 1962 à 1972 (Fig. 11).

En règle générale la visibilité de nuit est supérieure à la visibilité de jour. La raison fondamentale réside dans la plus forte concentration en poussières durant la journée, quand les vitesses des vents qui les véhiculent sont élevées par rapport aux calmes relatifs nocturnes.

Les particules peuvent d'ailleurs être précipitées par coalescence avec les brumes humides de début de soirée ou aux premières heures de la matinée. Dans deux tiers des cas, la brume humide apparaît entre minuit et 07H00 TU.

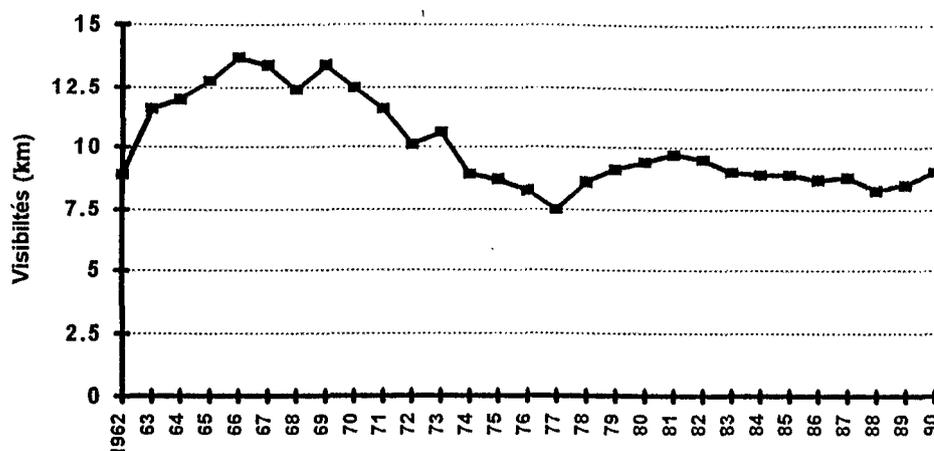


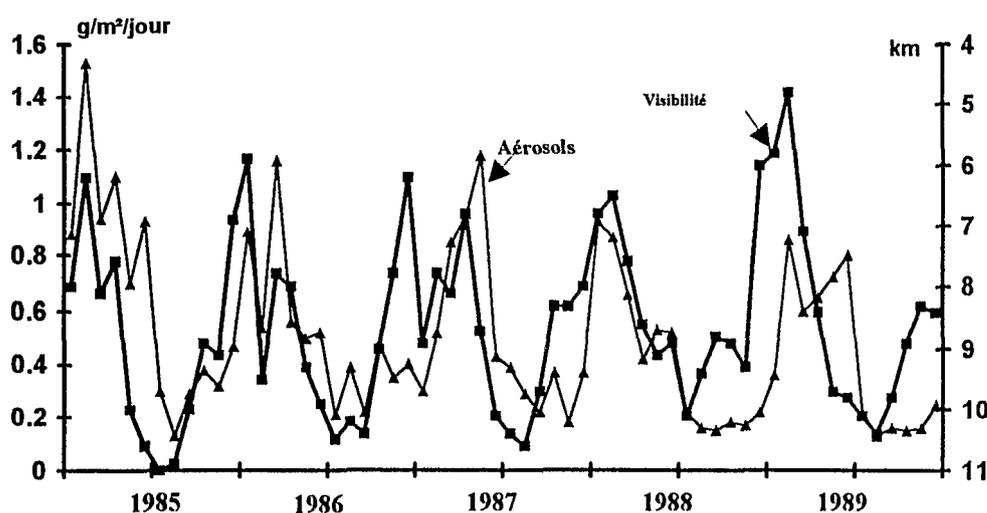
Fig. 11 - Evolution de la visibilité moyenne annuelle de 1962 à 1990

Sur l'ensemble de la période considérée, la visibilité moyenne sur l'année est de l'ordre de 10 km. L'évolution des visibilitées annuelles depuis 1962 suggère le classement des 30 années d'observations en deux périodes :

- de 1962 à 1971, la visibilité annuelle est largement supérieure à 10 km et la fréquence des hydrométéores est plus élevée que celle des lithométéores.

- de 1973 à aujourd'hui, la visibilité annuelle moyenne est inférieure à 10 km. De 1973 à 1980 on assiste à une très forte augmentation des fréquences de brumes sèches (91% de l'ensemble des brumes sèches de la période étudiée) tandis que depuis 1980 on note une diminution de ces brumes au profit des brumes de sable.

Cette évolution des visibilitées annuelles est sans doute liée à l'alternance de phases de pluviométrie abondante et de sécheresse, mais aussi à la circulation atmosphérique générale. La figure 12 montre que visibilité horizontale et dépôts de poussières suivent le même rythme annuel.



En effet, l'analyse statistique de 760 couples de mesures quotidiennes de dépôts de poussières (effectuées entre 1984 et 1986) et de la visibilité horizontale a montré que ces deux paramètres climatiques étaient interdépendants (Fig. 13).

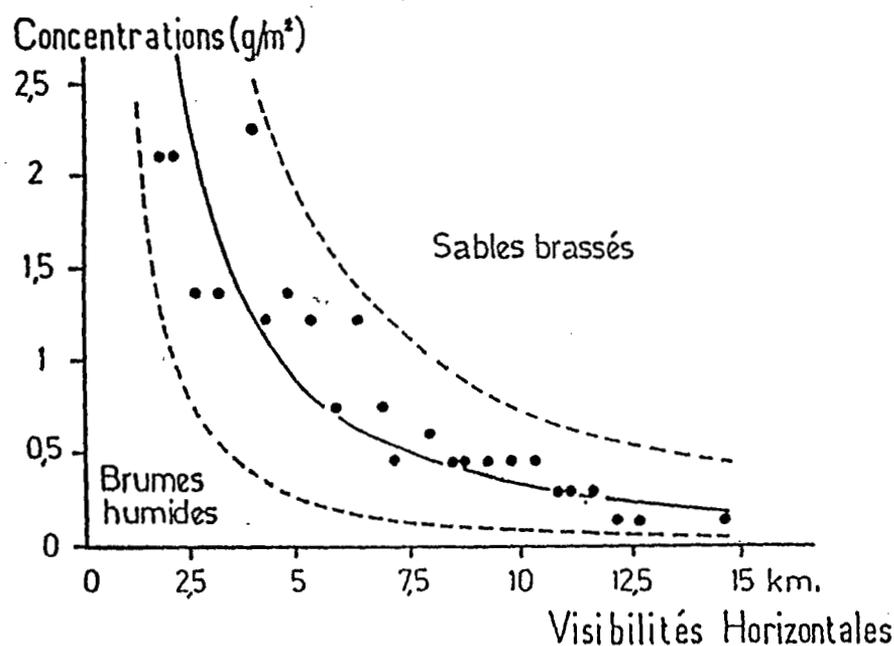


Fig. 13 - Courbe moyenne et courbes limites fixant le degré d'interdépendance entre les brumes sèches et la visibilité (GAC et al., 1986)

Le regroupement en moyennes par classes, des valeurs de concentrations (classes de 1 g/m<sup>2</sup>/j) et de visibilités horizontales (classes de 0.1 km), nous a permis d'établir la relation suivante: (GAC et al. (1986))

$$C \cdot V^{1.35} = 7.77 \text{ (coeff. de corrélation } r = 0.93)$$

C : dépôts en g/m<sup>2</sup>/j,  
V : visibilités horizontales en km

Les études granulométriques montrent que cette relation est variable selon l'éloignement de la station-puits par rapport aux zones sources.

La visibilité peut être perturbée soit par des phénomènes locaux de chasse-sable qui sont en fait relativement rares, soit plus fréquemment, par des brumes humides (nocturnes ou matinales), soit le plus souvent par des brumes sèches.

L'application de la relation aux visibilités de nuit d'une part, et de jour d'autre part, montre que 44 % des poussières se déposeraient le jour contre 56 % la nuit. Ces chiffres sont en accord avec les phénomènes décrits.

## Conclusion

Cette reconnaissance sur la composition chimique et isotopique des pluies conduit à considérer deux sources et deux itinéraires différents pour la vapeur génératrice des pluies de mousson et des aérosols porteurs de sels marins (à ne pas confondre avec les apports éoliens). La vapeur en provenance du Sud n'apporterait que très peu de sels et se condenserait selon un processus assez simple au sommet d'un profil d'atmosphère pratiquement saturé en vapeur d'eau. La forte teneur saline des précipitations est due à un apport direct d'embruns et d'aérosols océaniques.

L'excès en sels d'origine marine dans les précipitations par rapport au réseau hydrographique de surface implique deux autres conséquences :

- au cours de la période de sécheresse actuelle, les nappes phréatiques ne contribuent pratiquement pas à l'écoulement de surface du fleuve Sénégal. Une augmentation de la minéralisation du réseau de surface serait donc à attendre en année pluvieuse sous les effets cumulés du "rinçage" des sols et de l'apport des pluies.

- la régulation saline des nappes s'effectue nécessairement par écoulement souterrain vers des systèmes endoréiques avec accumulation localisée de sels, ce qui confirme une notion hydrogéologique bien établie au Sénégal.

Le Sahara est la plus grande source de poussières atmosphériques du globe. Au niveau du lac de Guiers, leurs dépôts sont de l'ordre de  $170 \text{ g/m}^2/\text{an}$ . Il est important de noter que 25% des apports annuels de poussières se font en saison humide, donnant aux pluies africaines une composition chimique caractéristique (ORANGE, 1990).

L'analyse chimique des éléments majeurs des lithométéores semble indiquer que le vent a tendance à homogénéiser la production de poussières, gommant ainsi un certain nombre de disparités minéralogiques et chimiques des substrats originels. Dans les faits, par exemple, la bonne aptitude potentielle de nombreuses dépressions telles que les sebkhas est estompée.

Par son extension géographique, son intensité et sa fréquence qui l'apparente à une véritable "pollution atmosphérique", la brume sèche apparaît comme un phénomène climatique majeur. Elle nécessite à ce titre des études plus approfondies sur les conditions de sa formation dans les zones sources, sur les mécanismes et les processus de transport, de décantation et de sédimentation qui en résultent, sur les caractéristiques granulométriques, minéralogiques et chimiques des poussières réceptionnées dans différentes stations-puits.

Enfin cette étude montre l'intérêt des mesures de visibilité; elle devrait permettre en particulier de reconstituer l'évolution de l'importance des vents de sable et de poussières à l'échelle du siècle et aboutir à un meilleur ajustement des modèles globaux de circulation atmosphérique. Elle souligne aussi l'importance des aérosols désertiques pour une meilleure compréhension de la dynamique actuelle des paysages dans ces régions subsahariennes. Les aérosols constituent en effet, dans les carottes lacustres ou dans les sédiments marins, des archives sur les climats qui se sont succédés depuis des millénaires. Ils sont de nature à permettre éventuellement des interprétations paléoclimatiques et la reconstitution des paléoenvironnements.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CHESELET R., MORELLI J., BUAT-MENARD P. (1972) - variation in ionic ratios between reference sea water and marine aerosols. Journ. Geophys. Res., 77, 27 : 5116-5131.
- CHESTER R., JOHNSON L.R. (1971) - Atmospheric dusts collected off the west african coast. Nature, 229, p.105-107.
- COUDE-GAUSSSEN G. (1989) - Les poussières sahariennes et leur contribution aux sédimentations désertiques et péri-désertiques. Thèse Lettres, Géographie, univ. Paris VI, 715 p.
- FAURE H., GAC J.Y. (1981) - Solar cycle and drought in Sahel. Abstract volume of Proceedings of the 9 th Intern. Congress of Biometeorology, session " Interdisciplinary " Cycle research " (Overdieck D., Mueller J. and Lieth H. Eds) , Osnabruck (R.F.A.), 23-30 septembre 1981, ICR 04, pp. 92-93.
- FAURE H., GAC J.Y. (1981) - Un futur cycle aride au Sahel vers l'an 2 005 ?. Proceedings of the first meeting of the E.U.G. (European Union Geoscience), Strasbourg, 13-16 avril 1981, p. 105 (Terra Cognita, special issue)
- FAURE H., GAC J.Y. (1981) - Will the sahelian drought end in 1985 ?. Nature, 291, pp. 475-478.
- GAC J.Y. (1985) - Le phénomène des brumes sèches au Sénégal en 1984-1985. Bull. Veille Climatique Satellitaire, ORSTOM, Paris, 7, p.31-35.
- GAC J.Y., CARN M. (1986) - Importance des aérosols troposphériques de janvier 1984 à Mars 1986 sur la presqu'île du Cap-Vert du Sénégal. Bulletin Veille Climatique Satellitaire, Lannion, 12, pp. 52-56.
- GAC J.Y., CARN M., DIALLO M.I., ORANGE D., TANRE D. (1986) - Corrélation entre brumes sèches et visibilité horizontale au sol à partir de mesures quotidiennes au Sénégal pendant trois années. C. R. Acad. Sciences, Paris, 303, Sér. II, 11, pp. 1025-1027.
- GAC J.Y., FAURE H. (1987).- Le "vrai" retour à l'humide au Sahel est'il pour demain?. C.R. Acad. Sciences, Paris, t. 305, sér. II, pp. 777-780.
- GAC J.Y., TRAVI Y. (1984) - Etude quantitative et qualitative des poussières atmosphériques en provenance du Sahara entre Dakar et Nouakchott. X ème R.A.S.T., Bordeaux, I.G.B.A. (Ed.), p. 237.
- GORHAM E. (1955) - On the acidity and salinity of rain. Geochim. Cosmochim. Acta, 7, p.231-239.
- GORHAM E. (1957) - The chemical composition of rain from roscahill in country Galway. Irish Natural Journ., XII : 122-125.
- GORHAM E. (1961) - Factors influencing supply of major ions to inland waters, with special reference to the atmosphere. Geol. Soc. Am. Bull., 72 : 795-840.
- JUNGE C. E., GUSTAFSON P. E. (1957) - On the distribution of sea salt over the United States and its removal by precipitation. Tells, IX, 2 : 104-173.
- JUNGE C. E., WERBY R. T. (1957) - The concentration of chloride, potassium, calcium and sulfate in rain water over the United States. Journ. Meteor., 15 (5) : 417-425.

- KREMPP G. (1982) - Techniques de prélèvement des eaux naturelles et des gaz associés, méthodes d'analyse des eaux et des roches. Note technique, Géologie, univ. Strasbourg, 19, 79 p.
- LEROUX M. (1988)- La variabilité des précipitations en Afrique Occidentale : les composantes aérologiques du problème. Veille Climatique satellitaire, ORSTOM, Coop., Lannion, 22, pp26-45.
- MATHIEU P. (1976) - Influence des apports atmosphériques et du pluviollessivage forestier sur la qualité des eaux de deux bassins versants en Côte d'Ivoire. Cah. ORSTOM, sér. Géol., Paris, VIII, p.11-32.
- MATHIEU P., MONNET C. (1971) - Physico-chimie des eaux de pluie en savane et sous forêt en milieu tropical. Cah. ORSTOM, sér. Géol., Paris, III, p.93-114.
- OLIVA P., COUDE-GAUSEN G., DELANNOY H., DORIZE L., ROGNON P., TABEAUD M. (1983).- Etude de la dynamique de quelques lithométéores sahariens par télédétection spatiale. Méditerranée Télédétection III, pp. 21-52.
- ORANGE D. (1990) - Hydroclimatologie du Fouta Djalon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique. Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, 241 p.
- ORANGE D., GAC J.Y. (1990) - Bilan géochimique des apports atmosphériques en domaines sahélien et soudano-guinéen d'Afrique de l'Ouest (bassins supérieurs du Sénégal et de la Gambie). Géodynamique, V, 1, pp. 51-65.
- ORANGE D., GAC J.Y., PROBST J.L., TANRE D. (1990) - Mesure du dépôt au sol des aérosols désertiques, une méthode simple de prélèvement : le capteur pyramidal. C.R. Acad. Sc., Paris, 311, série II, p.167-172.
- PAQUET H., COUDE-GAUSSSEN G., ROGNON P. (1984) - Etude minéralogique de poussières sahariennes le long d'un itinéraire entre 19° et 35° de latitude nord. Rev. Géol. Dyn. Géogr. Phys., Paris, 25, pp.257-265.
- PROSPERO J.M., GLACCUM R.A., NEES R.T. (1981) - Atmospheric transport of soil dust from Africa to south America. Nature, 289, p.570-572.
- SASSEVILLE J. L., LACHANCE M. (1981) - Description de la qualité des eaux atmosphériques. Eau, Québec, 14 : 27-34.
- TRAVI Y., GAC J.Y., FONTES J.C., FRITZ B. (1987) - Reconnaissance chimique et isotopique des eaux de pluie au Sénégal. Géodynamique, ORSTOM, Paris, 2, p.1-11.
- TRAVI Y., GAC J.Y., GIBERT E., LEROUX M., FONTES J.C. (1993). - Composition isotopique et genèse des précipitations sur Dakar pendant les saisons des pluies 1982 et 1984. Abstract et poster au Congrès de l'AIHS, Vienne, 11-22 août 1991.
- TUCKER C.J., DREGNE H.E., NEWCOMB W.W. (1991) - Expansion and contraction of the Sahara desert from 1980 to 1990. Sciences, vol.253, Reports, pp.299-300.