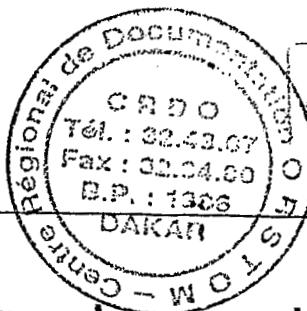


091576

Rapport Interne Orstom



CRD - DAKAR
date 13/04/97
11508 cote JCP ORA/1

N

Composition chimique des poussières atmosphériques
déposées au Sénégal

par D. ORANGE, J.Y. GAC et M.I. DIALLO

92

D. ORANGE,
Laboratoire d'Hydrologie, ORSTOM, BP 893, Bangui, République Centrafricaine
J.Y. GAC,
Laboratoire de Géologie, ORSTOM, BP 1386, Dakar, Sénégal
M.I. DIALLO,
Département de Géographie, Université de Dakar, Sénégal

- Décembre 1992 -

Fonds Documentaire ORSTOM
Cote : B* 16939 Ex : *en cours*

Fonds Documentaire ORSTOM



010016939

32

Ce rapport présente l'ensemble des données acquises par l'équipe de J.Y. GAC (Laboratoire de Géologie, Orstom Dakar, Sénégal) depuis 1983 sur la qualité chimique des poussières atmosphériques déposées en Afrique de l'Ouest.

Les lieux d'observations concernés sont Nouakchott (Mauritanie) en 1983, Dakar (Sénégal) de 1983 à 1987, Pété (Sénégal) de 1986 à 1987 et Mbour (Sénégal) de 1986 à 1987.

Les analyses chimiques ont été réalisées pour une part par J. GAUTHHEYROU du *Laboratoire des Formations Superficielles* de l'Orstom à Bondy (France) et pour une autre part par H. PAQUET du *Centre de Géochimie de la Surface* du CNRS à Strasbourg (France).

Les premiers résultats de ces analyses seront présentés au Congrès de l'IAHS en juillet 1993 au Japon par D. ORANGE. Cette communication correspond à l'article ci-joint en annexe sous sa forme *pre-print* intitulé : **Constituent composition of Harmattan dust and geochemical balance of atmospheric depositions in continental West Africa.**

1) Les résultats d'analyse chimique

Le lot d'échantillons analysés (85 au total) correspond à :

- 1 échantillon de Nouakchott regroupant la période 3-10/4/83,

- 49 échantillons de Dakar se répartissant en :

- 2 échantillons événementiels de 1983,

- 9 échantillons à regroupement mensuel de 1984,

- 12 échantillons à regroupement mensuel de 1985,

- 12 échantillons à regroupement mensuel de 1986,

- 9 échantillons à regroupement mensuel de 1987,

- 5 échantillons correspondant aux cinq dépôts journaliers les plus élevés de 1987 ;

- 15 échantillons de Pété se répartissant en :

- 9 échantillons à regroupement mensuel de 1986,

- 5 échantillons à regroupement mensuel de 1987,

- 1 échantillon correspondant au plus fort dépôt enregistré en 1987 ;

- 20 échantillons de Mbour se répartissant en :

- 12 échantillons à regroupement mensuel de 1986,

- 8 échantillons à regroupement mensuel de 1987.

Tableau 1 : Résultats d'analyse chimique par échantillon

Poussières atmosphériques															Analyses chimiques															
Station	Nouakchott	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar		
Ref.	Nouakchott	117724	117725	117726	117727	117728																								
Date	3-10/4/83	21-27/3/83	25-1/5/83	Jan-84	Fév-84	Mar-84	Avr-84	Mai-84	Jul-84	Oct-84	Nov-84	Déc-84	Jan-85	Fév-85	Mar-85	Avr-85														
C _i (g/m ²)	1,46	0,38	1,49	1,03	1,62	1,11	0,65	1,17	0,89	1,58	0,46	0,68	0,88	1,53	0,93	1,10														
laboratoire	Stbg	Stbg	Stbg	Stbg	Stbg	Stbg	Stbg	Stbg	Stbg	Stbg	Stbg	Stbg	Stbg	Stbg	Stbg	Stbg	Stbg	Stbg	Stbg	Stbg	Stbg	Stbg	Stbg	Stbg	Stbg	Stbg	Stbg	Stbg		
SiO ₂ (%)	73,1	71,0	73,6	73,4	74,9	75,6	74,4	74,6	75,6	74,5	72,7	70,9	72,1	73,5	71,8	71,7														
SiO ₂ (1)																														
SiO ₂ (2)																														
Al ₂ O ₃	10,5	9,3	10,9	12,4	13,4	12,3	11,9	11,7	12,2	12,8	12,3	13,6	12,4	12,6	13,3	12,6														
Fe ₂ O ₃	3,4	3,8	4,0	5,1	5,1	4,9	5,3	4,9	4,7	5,2	5,1	5,4	4,8	4,8	5,1	4,7														
TiO ₂	0,64	0,68	0,81	0,98	1,04	0,96	0,96	0,89	0,86	0,93	0,86	0,95	0,90	0,96	0,94	0,89														
Mn ₃ O ₄	0,049	0,056	0,060	0,093	0,082	0,065	0,065	0,070	0,067	0,069	0,063	0,071	0,063	0,073	0,075	0,067														
MnO ₂																														
P ₂ O ₅																														
CaO	2,40	2,00	2,00	2,00	1,50	2,00	2,40	2,10	2,20	2,30	2,20	2,10	2,20	1,50	1,90	2,40														
MgO	2,22	1,22	1,44	1,49	1,35	1,51	1,42	1,42	1,59	1,54	1,48	1,46	1,49	1,31	1,51	1,58														
K ₂ O	2,34	1,99	2,30	2,20	2,20	2,24	2,05	2,10	2,30	2,29	2,15	2,18	2,22	2,20	2,25	2,26														
Na ₂ O	1,45	1,04	1,24	0,96	0,92	1,08	0,90	1,02	1,11	1,08	1,01	1,20	1,43	0,98	0,98	1,42														
H ₂ O(+)	4,53	7,62	4,31	1,08	0,00	0,00	0,23	0,87	0,00	0,00	1,81	1,64	1,94	1,83	1,85	2,13														
BaO	0,070	0,060	0,060	0,070	0,070	0,060	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,280	0,070	0,070	0,030														
SrO	0,020	0,000	0,010	0,040	0,030	0,020	0,020	0,030	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,040	0,040	0,040														
Total	100,719	98,566	100,73	98,923	100,8	100,94	99,765	99,13	100,93	101,05	98,193	98,361	98,063	98,173	98,145	97,867														

Station	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar																			
Ref.	117729	117730	117731	117732	117733	117734	117735	117736	117737	117738	117739	D1	D2	D3	D4	D5	D6														
Date	May-85	Jul-85	Jul-85	Ao0-85	Sep-85	Oct-85	Nov-85	Déc-85	Jan-86	Fév-86	Mar-86	Avr-86	May-86	Jun-86	Jul-86	Aug-86	Sep-86														
C(g/m ²)	0,70	0,93	0,29	0,14	0,29	0,38	0,32	0,47	0,89	0,54	1,16	0,56	0,50	0,52	0,21	0,39	0,21														
laboratoire	Stbg	Bondy	Bondy	Bondy	Bondy	Bondy	Bondy	Bondy	Bondy	Bondy	Bondy	Bondy	Bondy	Bondy	Bondy	Bondy	Bondy	Bondy													
SiO ₂ (%)	73,1	72,9	67,7	66,0	68,8	70,0	70,0	70,3	70,6	72,4	74,0	77,3	74,4	79,2	72,6	76,8	69,5														
SiO ₂ (1)																															
SiO ₂ (2)																															
Al ₂ O ₃	10,9	12,7	15,2	15,1	14,2	13,9	13,8	14,5	14,5	13,1	12,6	9,4	9,7	8,8	10,6	8,8															
Fe ₂ O ₃	4,0	4,8	6,7	7,8	6,4	5,9	6,2	6,1	5,6	5,4	5,2	5,6	5,3	6,9	5,6	7,1															
TiO ₂	0,73	0,85	1,04	1,10	0,97	1,00	1,00	1,03	1,04	0,98	0,95	0,81	0,81	0,75	0,87	0,87															
Mn ₃ O ₄	0,049	0,063	0,076	0,073	0,071	0,063	0,067	0,072																							
MnO ₂																															
P ₂ O ₅	0,160	0,180	0,480	0,660	0,340	0,330	0,340	0,310	0,230	0,220	0,190	0,219	0,244	0,225	0,475	0,412	0,387														
CaO	1,80	1,80	3,20	2,80	2,20	2,20	2,60	2,70	1,90	2,30	2,00	2,06	2,25	1,62	3,00	2,30															
MgO	1,23	1,44	1,83	1,82	1,83	1,60	1,71	1,65	1,56	1,52	1,56	1,50	1,56	1,31	1,50	1,37	2,00														
K ₂ O	2,08	2,22	2,07	2,02	2,25	2,22	2,14	2,28	2,33	2,31	2,35	0,87	1,12	1,00	0,87	0,87															
Na ₂ O	1,06	1,02	0,88	0,86	1,02	1,06	0,97	0,94	0,98	1,05	1,10	0,14	1,10	0,92	0,95	1,20	0,20														
H ₂ O(+)	1,80	1,94	0,72	1,67	1,82	1,64	1,07	0,02	1,09	0,58	0,00	2,08	2,85	0,86	2,16	1,83	2,60														
BaO	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,080	0,070	0,070	0,070	0,039	0,034	0,036	0,047	0,037	0,045														
SrO	0,120	0,020	0,030	0,030	0,020	0,030	0,030	0,020	0,020	0,020	0,020																				
Total	98,199	98,063	99,276	98,333	98,181	98,363	98,927	99,982	98,906	99,422	100,12	97,917	97,146	99,14	97,839	98,166	97,401														

Station	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar	Dakar												
Ref.	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18	ae87-35	ae87-58	ae87-68	ae87-83	ae87-108												
Date	Oct-85	Nov-86	Déc-86	Jan-87	Fév-87	Mar-87	Avr-87	Mal-87	Jul-87	ao0-87	Sep-87	4/2/87</td																	

Station	Pété	Mbour	Mbour	Mbour														
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	M1	M2	M3
Ref.	Fév-86	Mai-86	Avr-86	May-86	Jul-86	Jul-86	Oct-86	Nov-86	Déc-86	Jan-87	Fév-87	Mar-87	Avr-87	Mai-87	5/5/87	Jan-86	Fév-86	Mar-86
Caste	77,2	75,1	73,7	75,5	76,5	77,4	76,9	79,2	76,3	78,3	79,8	80,1	78,9	74,0	74,0	73,0	75,3	76,9
C _{CO2} (m2)	0,41	0,45	0,28	0,49	0,35	0,31	0,27	0,26	0,64	0,34	0,67	0,89	0,79	1,65	20,86	0,29	0,24	0,35
laboratoire	Bonny																	
SiC2(T)	77,2	75,1	73,7	75,5	76,5	77,4	76,9	79,2	76,3	78,3	79,8	80,1	78,9	74,0	74,0	73,0	75,3	76,9
SiC2(1)	59,8	56,0	52,8	55,7	57,6	59,3	58,8	62,3	56,7	60,5	63,3	64,3	62,0	54,5	55,2	51,8	58,2	58,0
SiC2(2)	18,1	13,2	21,1	19,8	18,9	18,1	18,1	16,9	19,6	17,8	16,5	15,8	16,9	19,5	18,8	21,4	19,1	18,9
A12D3	10,3	11,0	12,4	11,2	11,0	10,4	10,3	9,8	11,0	10,5	9,4	9,0	9,5	10,4	9,8	12,5	11,1	10,3
A2D3	5,2	5,3	5,9	5,5	5,8	5,4	5,0	4,8	5,3	4,9	4,8	4,5	4,8	5,5	5,6	6,3	5,8	5,3
H1C2	0,31	0,92	1,03	1,00	1,00	1,00	0,80	0,80	0,97	0,95	0,87	0,87	0,92	0,92	0,75	1,12	1,00	1,00
Mm3D4																		
MmD2	0,015	0,103	0,119	0,118	0,110	0,099	0,095	0,095	0,095	0,103	0,071	0,079	0,079	0,095	0,099	0,099	0,095	0,103
P2D5	0,140	0,135	0,141	0,115	0,130	0,125	0,170	0,190	0,160	0,200	0,165	0,140	0,150	0,120	0,112	0,294	0,305	0,275
CaO	0,52	1,10	0,69	0,67	0,60	0,55	0,56	0,52	0,60	0,72	0,66	0,18	0,77	2,15	2,70	0,87	0,95	0,85
MgO	1,25	1,40	1,44	1,50	1,42	1,37	1,30	1,20	1,20	1,05	1,02	1,10	1,10	1,70	1,75	1,44	1,30	1,40
K2D0	1,11	1,27	1,32	1,31	1,15	1,12	1,15	1,00	1,02	0,95	0,90	0,92	0,87	1,15	1,09	1,06	1,05	1,02
Na2D0	0,11	0,12	0,11	0,11	0,12	0,10	0,11	0,10	0,08	0,10	0,07	0,10	0,09	0,15	0,18	0,22	0,17	0,14
H2D0+	2,40	3,52	3,15	3,00	2,38	2,55	3,63	2,50	3,28	2,23	2,46	3,00	2,71	3,74	3,90	3,16	2,94	2,73
EaO	0,032	0,020	0,041	0,021	0,027	0,034	0,032	0,029	0,030	0,031	0,028	0,024	0,150	0,120	0,112	0,040	0,038	0,025
SiO	0,015	0,015	0,012	0,010	0,015				0,020	0,015	0,020	0,010	0,010	0,005	0,005			0,010
Total	97,3	95,48	96,85	97	97,62	97,45	96,37	97,504	96,72	97,77	97,54	97	97,29	96,26	96,1	96,843	97,058	97,273

Station	Mbour	Mbour																
	M4	M5	M8	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20	
Ref.	Avr-86	Mai-86	Jul-86	Jul-86	Aoû-86	Sep-86	Oct-86	Nov-86	Déc-86	Jan-87	Fév-87	Mar-87	Avr-87	Mai-87	Jul-87	Jul-87	Aoû-87	
Caste	0,31	0,51	0,52	0,20	0,48	0,20	0,31	0,22	0,26	0,21	0,33	0,54	0,86	1,72	0,82	0,40	0,27	
laboratoire	Bonny	Bonny																
IC2(T)	77,4	77,4	78,5	74,4	77,6	69,3	76,1	74,8	72,4	73,6	76,4	77,8	75,7	79,1	78,8	75,6	71,0	
IC2(1)	59,7	60,5	80,5	53,5	59,8	43,4	57,2	54,8	50,9	54,2	58,6	61,7	57,6	62,1	62,3	57,4	48,8	
IC2(2)	17,7	17,0	18,0	20,9	17,8	25,9	18,9	20,0	21,6	19,4	17,8	16,1	18,1	17,1	16,5	18,2	22,2	
A12D3	9,5	9,2	9,4	11,5	9,6	14,6	9,8	11,1	12,3	11,5	10,1	9,5	9,1	9,3	9,0	9,8	12,4	
A2D3	5,0	4,8	4,9	5,6	4,9	6,8	5,5	5,9	6,3	6,3	5,4	4,8	4,8	4,9	4,8	6,0		
H1C2	0,57	0,78	0,80	0,81	0,77	0,90	0,78	0,90	1,06	1,00	0,94	0,90	0,72	0,90	0,77	0,85	0,90	
Mm3D4																		
MmD2	0,099	0,103	0,110	0,099	0,087	0,111	0,089	0,095	0,109	0,095	0,089	0,087	0,087	0,087	0,079	0,087	0,079	
P2D5	0,312	0,220	0,182	0,275	0,170	0,220	0,244	0,360	0,266	0,450	0,275	0,215	0,137	0,185	0,142	0,180	0,180	
CaO	0,94	1,40	0,90	1,06	0,87	0,84	0,87	0,95	0,94	1,50	0,97	0,85	2,05	0,82	0,97	0,77	0,74	
MgO	1,37	1,55	1,45	1,75	1,55	2,00	1,75	1,45	1,37	1,45	1,31	1,20	1,80	1,20	1,47	1,30	1,65	
K2D0	0,52	0,95	0,95	1,19	1,00	1,40	1,18	1,15	1,18	1,00	1,06	1,00	1,10	0,92	1,07	1,05	1,30	
Na2D0	0,12	0,10	0,11	0,17	0,12	0,17	0,13	0,18	0,15	0,17	0,14	0,11	0,12	0,11	0,12	0,14	0,18	
H2D0+	3,43	3,46	2,67	3,11	3,30	3,72	3,59	3,70	4,01	3,00	3,38	3,61	4,35	2,45	2,80	5,44	5,54	
aO	0,025	0,027	0,026	0,034	0,025	0,038	0,030	0,033	0,035	0,032	0,031	0,027	0,030	0,027	0,025	0,026	0,033	
rO	0,012	0,010	0,005		0,005		0,005		0,005		0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005		
Total	95,539	95,54	97,333	96,888	96,697	96,279	96,408	96,898	95,995	96,997	96,62	96,394	95,649	97,554	97,201	94,558	94,462	

2) Lescalculs de moyenne

La moyenne annuelle est obtenue en pondérant les valeurs mensuelles par le taux moyen journalier de dépôt du mois considéré. Ensuite, la moyenne interannuelle est obtenue par une simple moyenne arithmétique des moyennes annuelles précédemment calculées.

Tableau 2 : Paramètres statistiques par station

	DAKAR										
STAT	Moyenne	Max	Min	Mediane	NB	NBVAL	Ecartype	Ecartypepe	Var	Varp	Sommeprod
C(g/m ²)											
SiO ₂ (T)	73,2	79,2	66,0	73,4	42	42	2,8	2,8	7,9	7,7	73,7
SiO ₂ (1)	55,9	63,2	44,0	56,2	18	18	4,8	4,5	21,3	20,1	44,2
SiO ₂ (2)	18,4	25,5	16,0	17,7	18	18	2,2	2,1	4,8	4,6	13,8
Al ₂ O ₃	11,8	15,2	8,5	12,3	42	42	2,0	1,9	3,8	3,8	11,8
Fe ₂ O ₃	5,8	7,8	4,0	5,8	42	42	0,8	0,8	0,6	0,6	5,3
TiO ₂	0,90	1,10	0,72	0,80	42	42	0,09	0,09	0,01	0,01	0,90
Mn ₃ O ₄	0,069	0,093	0,049	0,069	21	21	0,009	0,008	0,000	0,000	0,042
MnO ₂	0,083	0,103	0,072		21	21	0,007	0,007	0,000	0,000	0,033
Fe ₂ O ₅	0,266	0,670	0,135	0,245	42	42	0,123	0,121	0,015	0,015	0,239
CaO	2,24	4,00	1,50	2,20	42	42	0,47	0,46	0,22	0,21	2,13
MgO	1,54	2,00	1,23	1,50	42	42	0,16	0,16	0,02	0,02	1,50
K ₂ O	1,70	2,35	0,87	2,08	42	42	0,60	0,59	0,36	0,35	1,85
Na ₂ O	0,76	1,43	0,12	0,98	42	42	0,42	0,42	0,18	0,17	0,84
H ₂ O+	1,96	4,43	0,00	1,83	42	42	1,36	1,34	1,85	1,80	1,66
BaO	0,063	0,280	0,026	0,070	42	42	0,048	0,048	0,002	0,002	0,068
SrO	0,024	0,040	0,012	0,020	34	34	0,008	0,008	0,000	0,000	0,022

	MBOUR										
STAT	Moyenne	Max	Min	Mediane	NB	NBVAL	Ecartype	Ecartypepe	Var	Varp	Sommeprod
C(g/m ²)											
SiO ₂ (T)	75,5	79,1	69,3	75,9	20	20	2,6	2,6	7,0	8,7	76,6
SiO ₂ (1)	56,4	62,3	43,4	57,5	20	20	4,9	4,8	24,1	22,9	58,3
SiO ₂ (2)	19,1	25,9	16,1	18,5	20	20	2,3	2,3	5,5	5,2	18,3
Al ₂ O ₃	10,6	14,6	9,0	10,0	20	20	1,5	1,5	2,2	2,1	10,0
Fe ₂ O ₃	5,4	8,8	4,8	5,3	20	20	0,6	0,6	0,4	0,4	5,2
TiO ₂	0,89	1,12	0,72	0,90	20	20	0,11	0,10	0,01	0,01	0,87
Mn ₃ O ₄											
MnO ₂	0,094	0,111	0,079	0,095	20	20	0,010	0,009	0,000	0,000	0,092
P ₂ O ₅	0,244	0,450	0,137	0,232	20	20	0,078	0,076	0,006	0,006	0,216
CaO	1,01	2,05	0,74	0,92	20	20	0,31	0,30	0,10	0,09	1,03
MgO	1,49	2,00	1,20	1,45	20	20	0,21	0,21	0,05	0,04	1,44
K ₂ O	1,08	1,40	0,92	1,06	20	20	0,12	0,12	0,02	0,01	1,04
Na ₂ O	0,14	0,22	0,10	0,14	20	20	0,03	0,03	0,00	0,00	0,13
H ₂ O+	3,49	5,54	2,45		20		0,82	0,80	0,68	0,65	3,35
BaO	0,030	0,040	0,025		20		0,005	0,005	0,000	0,000	0,029
SrO	0,006	0,012	0,005		13		0,003	0,002	0,000	0,000	0,005

	PETE										
STAT	Moyenne	Max	Min	Mediane	NB	NBVAL	Ecartype	Ecartypepe	Var	Varp	Sommeprod
C(g/m ²)											
SiO ₂ (T)	77,1	80,1	73,7	77,1	14	65	2,1	2,0	4,2	3,9	76,9
SiO ₂ (1)	58,8	64,3	52,6	59,0	14	33	3,5	3,4	12,1	11,2	58,7
SiO ₂ (2)	18,3	21,1	15,8	18,1	14	33	1,5	1,4	2,1	2,0	18,2
Al ₂ O ₃	10,4	12,4	9,0	10,4	14	65	0,9	0,9	0,8	0,7	10,3
Fe ₂ O ₃	5,2	5,9	4,5	5,3	14	65	0,4	0,4	0,2	0,2	5,1
TiO ₂	0,93	1,03	0,80	0,92	14	65	0,07	0,07	0,01	0,00	0,92
Mn ₃ O ₄											
MnO ₂	0,097	0,119	0,071	0,095	14	38	0,014	0,013	0,000	0,000	0,093
P ₂ O ₅	0,149	0,200	0,115	0,141	14	62	0,026	0,025	0,001	0,001	0,143
CaO	0,74	2,15	0,16	0,64	14	65	0,45	0,43	0,20	0,19	0,94
MgO	1,29	1,70	1,02	1,28	14	65	0,19	0,19	0,04	0,04	1,32
K ₂ O	1,09	1,32	0,87	1,11	14	65	0,15	0,14	0,02	0,02	1,07
Na ₂ O	0,10	0,15	0,07	0,10	14	65	0,02	0,02	0,00	0,00	0,11
H ₂ O+	2,89	3,74	2,23	2,85	14	65	0,51	0,49	0,26	0,24	3,03
BaO	0,044	0,150	0,020	0,031	14	65	0,039	0,038	0,002	0,001	0,060
SrO	0,013	0,020	0,005	0,014	12	55	0,004	0,004	0,000	0,000	0,010

Tableau 3 : Moyennes par année et par station pondérées par le dépôt moyen mensuel (C des tableaux 1)

Poussières atmosphériques										Analyses chimiques									
MOYENNE DAKAR					MOYENNE MBOUR					MOYENNE PETE									
	1984	1985	1986	1987	MI	+/	EC		1986	1987	MI	+/	EC		1986	1987	MI	+/	EC
In	9	12	12	9	42				12	8	20				9	5	14		
SO ₂ (%)	74,3	72,0	74,2	74,7	73,8	+/	2,8		75,9	77,2	76,5	+/	2,6		78,3	77,3	78,8	+/	2,0
Al ₂ O ₃	12,6	12,9	11,3	9,5	11,6	+/	1,9		10,5	9,6	10,1	+/	1,5		10,8	9,8	10,3	+/	0,9
Fe ₂ O ₃	5,1	5,1	5,7	5,7	5,4	+/	0,8		5,4	5,0	5,2	+/	0,6		5,3	5,0	5,2	+/	0,4
TiO ₂	0,95	0,92	0,89	0,82	0,89	+/	0,09		0,88	0,86	0,87	+/	0,10		0,94	0,90	0,92	+/	0,07
MnO ₂	0,073	0,067	0,080	0,084	0,076	+/	0,007		0,100	0,086	0,093	+/	0,009		0,103	0,086	0,094	+/	0,013
FeO ₅	0,224	0,215	0,262	0,276	0,244	+/	0,121		0,248	0,191	0,219	+/	0,076		0,143	0,143	0,143	+/	0,025
CaO	2,04	2,07	2,08	2,48	2,16	+/	0,46		0,97	1,09	1,03	+/	0,30		0,67	1,15	0,91	+/	0,43
MgO	1,47	1,50	1,53	1,54	1,51	+/	0,18		1,51	1,39	1,45	+/	0,21		1,34	1,31	1,33	+/	0,19
H ₂ O	2,20	2,21	1,57	1,01	1,75	+/	0,59		1,05	1,02	1,04	+/	0,12		1,16	1,00	1,08	+/	0,14
Na ₂ O	1,03	1,10	0,76	0,21	0,77	+/	0,42		0,14	0,12	0,13	+/	0,03		0,10	0,11	0,11	+/	0,02

Tableau 4 : Moyennes par trimestre à Dakar et Mbour

	Poussières atmosphériques						Analyses chimiques								
	MOYENNE DAKAR												MOYENNE MBOUR		
C	1.25	1.14	0.91	0.24											
SiC2(T)	74,8	73,3	72,9	67,8	70,1	74,2	73,8	74,4	75,1	72,9	76,8	75,0	74,5	77,7	73,7
SiC2(1)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		53,7	55,4	58,0	54,2	58,3	54,6	54,4	60,5	53,9
SiC2(2)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		20,1	19,0	17,2	18,7	18,4	20,3	20,1	17,2	19,8
Al2O3	12,4	12,9	12,5	14,8	14,1	11,8	10,6	10,2	9,2	10,5	10,1	11,2	10,9	9,4	10,8
Fe2O3	5,0	5,2	4,7	6,8	6,1	5,5	6,3	6,0	5,5	6,3	5,2	5,5	5,9	4,9	5,3
TiC2	0,96	0,92	0,89	1,02	1,01	0,91	0,81	0,86	0,81	0,83	0,91	0,81	0,91	0,85	0,87
Mn3O4	0,075	0,068	0,066	0,073	0,068	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
MnO2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,078	0,078	0,090	0,082	0,091	0,103	0,095	0,097	0,086	0,084
P2O5	0,216	0,243	0,165	0,459	0,325	0,217	0,422	0,310	0,229	0,473	0,251	0,205	0,284	0,193	0,180
CaO	1,96	2,23	1,91	2,72	2,51	2,01	2,40	2,11	2,53	2,16	1,01	0,91	0,92	1,14	0,76
MgO	1,45	1,51	1,43	1,83	1,65	1,52	1,57	1,56	1,53	1,58	1,43	1,70	1,54	1,38	1,44
K2O	2,19	2,24	2,21	2,13	2,22	1,83	1,00	1,08	1,00	1,04	0,98	1,13	1,16	1,00	1,15
Na2O	1,00	1,10	1,14	0,93	0,99	0,91	0,88	0,16	0,19	0,28	0,13	0,14	0,14	0,12	0,16
H2O+	0,35	0,71	1,92	1,35	0,83	1,04	2,12	3,18	3,65	3,91	3,05	3,35	3,59	3,13	5,48
BaO	0,068	0,112	0,093	0,070	0,070	0,059	0,042	0,030	0,033	0,031	0,029	0,030	0,032	0,028	0,029
SiO	0,027	0,022	0,032	0,030	0,027	0,015	0,000	0,010	0,017	0,008	0,007	0,003	0,004	0,005	0,003
Total	100,49	100,61	100,00	100,00	100,00	100,03	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Cl(g/m ³)	1,08	0,90	1,01	0,24	0,39	0,70	0,27	0,41	0,71	0,34	0,37	0,29	0,26	0,71	0,34

Tableau 5 : Moyennes interannuelles par station et inter-stations (DPM)

M₁ : moyenne arithmétique

MixC : moyenne interannuelle inter-stations pondérée par le dépôt moyen annuel, des moyennes interannuelles arithmétiques de chaque station

MIC : moyenne interannuelle inter-stations non pondérée, des moyennes interannuelles pondérée par le dépôt moyen mensuel de chaque station

MICxC : moyenne interannuelle inter-stations pondérée par le dépôt moyen annuel, des moyennes interannuelles pondérée par le dépôt moyen mensuel de chaque station

	DAKAR	PETE	MBOUR	DPM			
	MI	MI	MI	MI	MixC	MIC	MICxC
SiO ₂ (T)	73,8	76,8	76,5	75,7	75,5	75,8	75,4
SiO ₂ (1)	57,1	58,5	58,2	57,9	57,8	57,6	57,6
SiO ₂ (2)	18,0	18,3	18,4	18,2	18,2	18,4	18,3
Al ₂ O ₃	11,8	10,3	10,1	10,7	10,8	10,9	10,9
Fe ₂ O ₃	5,4	5,2	5,2	5,2	5,3	5,3	5,3
TiO ₂	0,89	0,82	0,87	0,90	0,89	0,90	0,90
Mn ₃ O ₄	0,070			0,070	0,028	0,070	0,029
MnO ₂	0,082	0,094	0,093	0,090	0,089	0,092	0,091
P ₂ O ₅	0,244	0,143	0,219	0,202	0,207	0,199	0,205
CaO	2,16	0,91	1,03	1,37	1,45	1,29	1,38
MgO	1,51	1,33	1,45	1,43	1,44	1,43	1,44
K ₂ O	1,75	1,08	1,04	1,29	1,34	1,34	1,39
Na ₂ O	0,77	0,11	0,13	0,34	0,38	0,35	0,40
H ₂ O+	1,9	3,0	3,3	2,7	2,7	2,7	2,6
BaO	0,063	0,056	0,029	0,050	0,051	0,041	0,044
SrO	0,021	0,010	0,005	0,012	0,013	0,013	0,014
Total	101,44	100,00	100,00	100,53	100,59	100,56	100,62
C(g/m ²)	0,54	0,38	0,41				

3) Représentations graphiques des compositions chimiques

Figure 1 : Evolution des teneurs en fonction de l'intensité du dépôt (échantillons événementiels de Dakar en 1987)

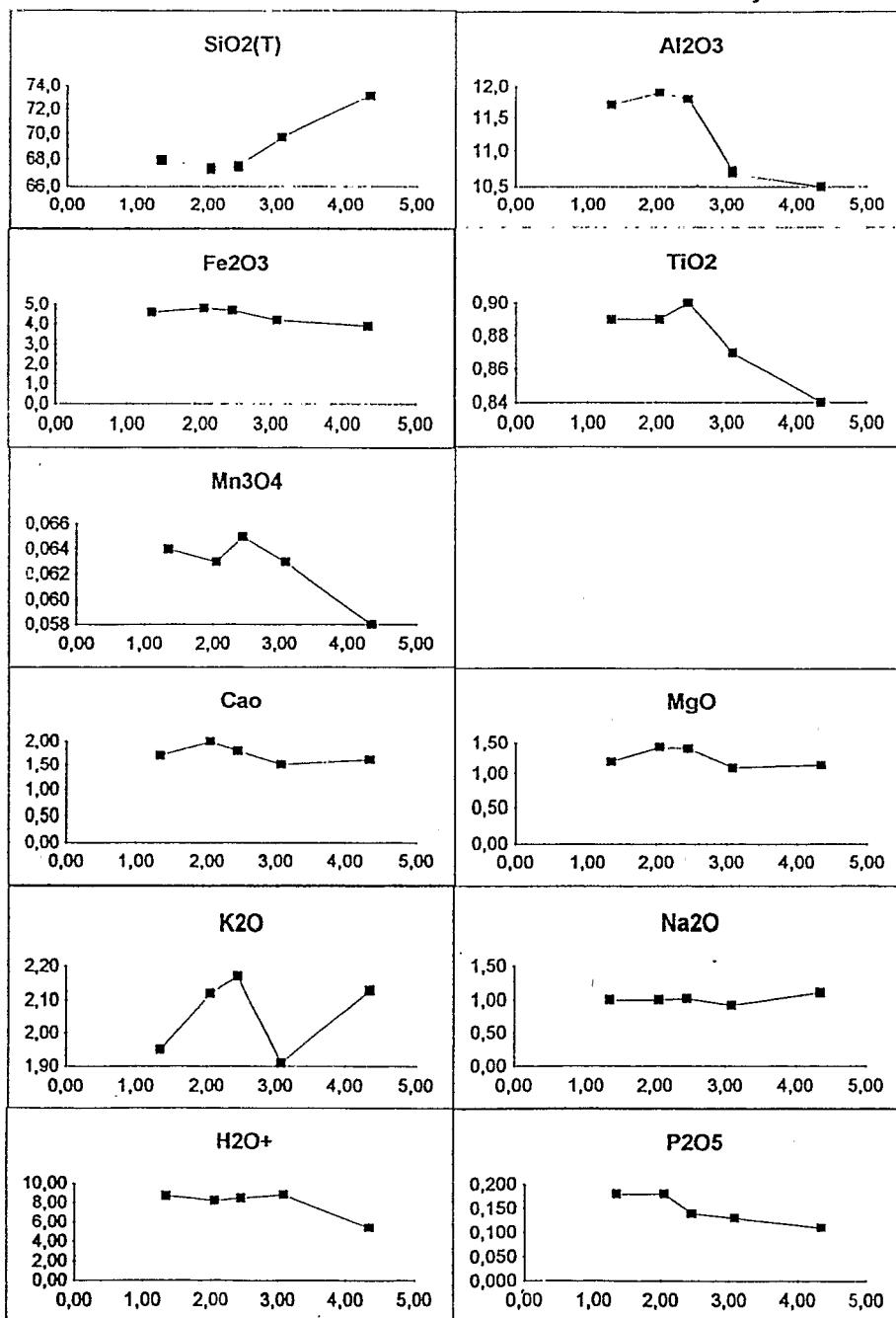


Figure 2 : Evolution des teneurs moyennes annuelles à Dakar

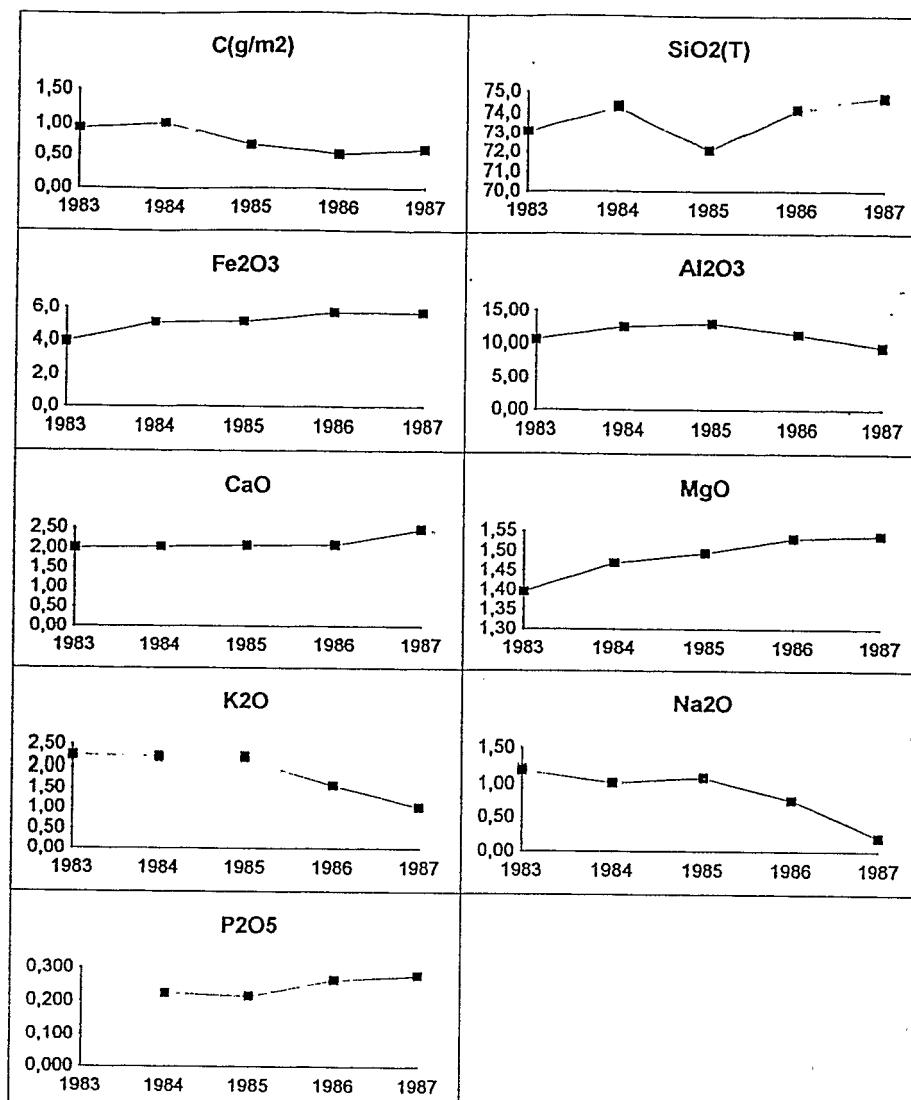
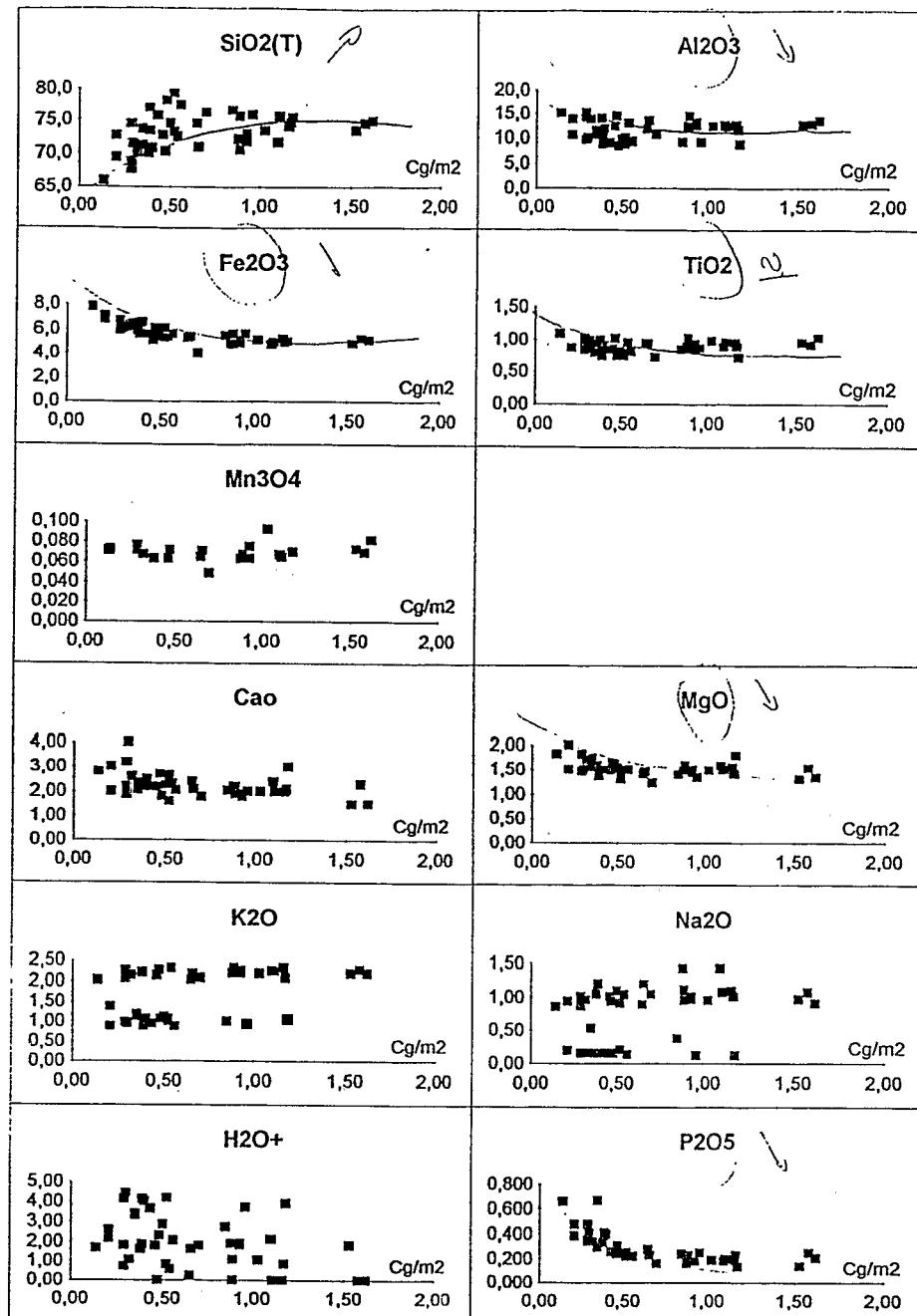


Tableau 6 : Dépôts moyens mensuels et annuels (en g/m²/jour)

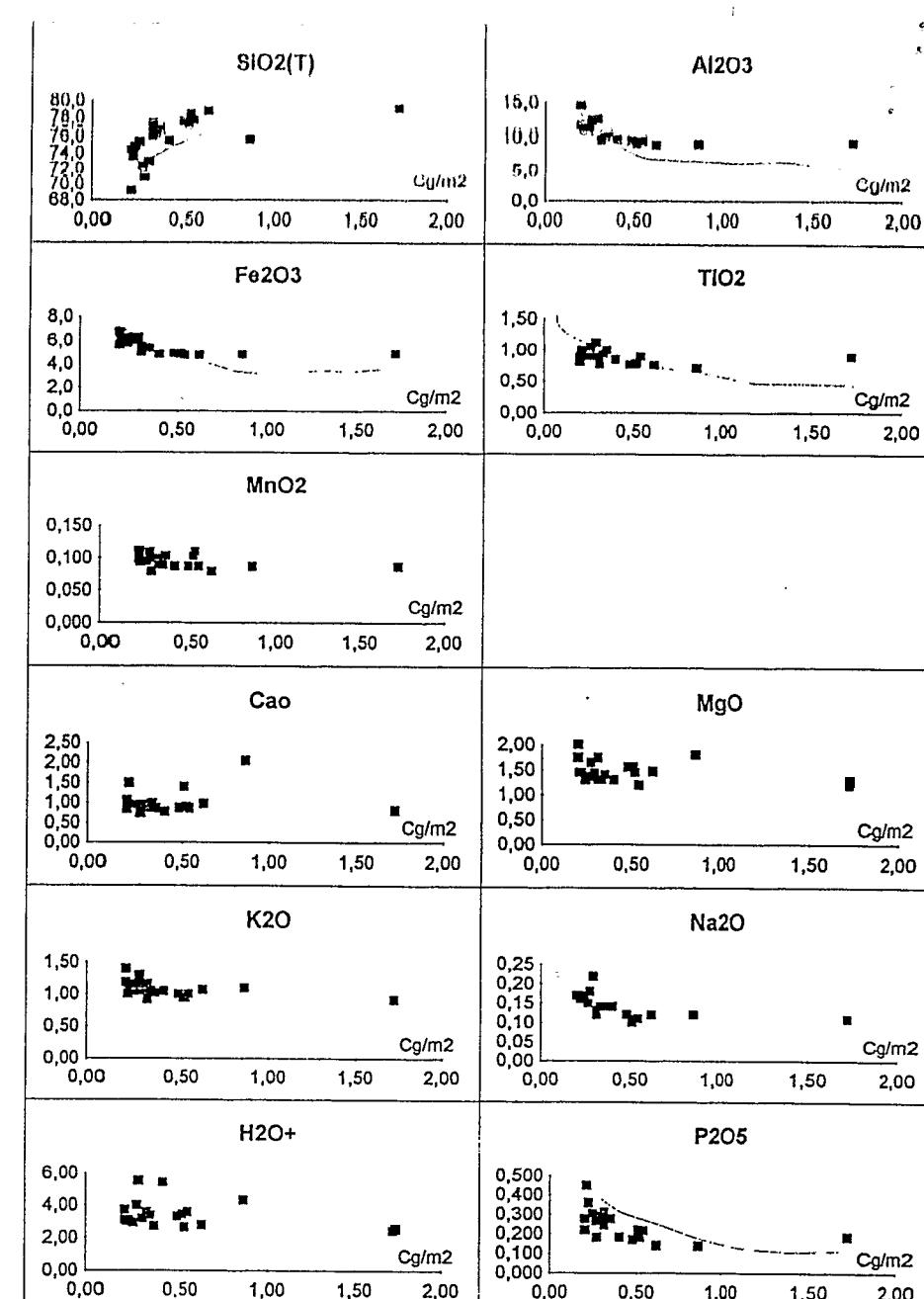
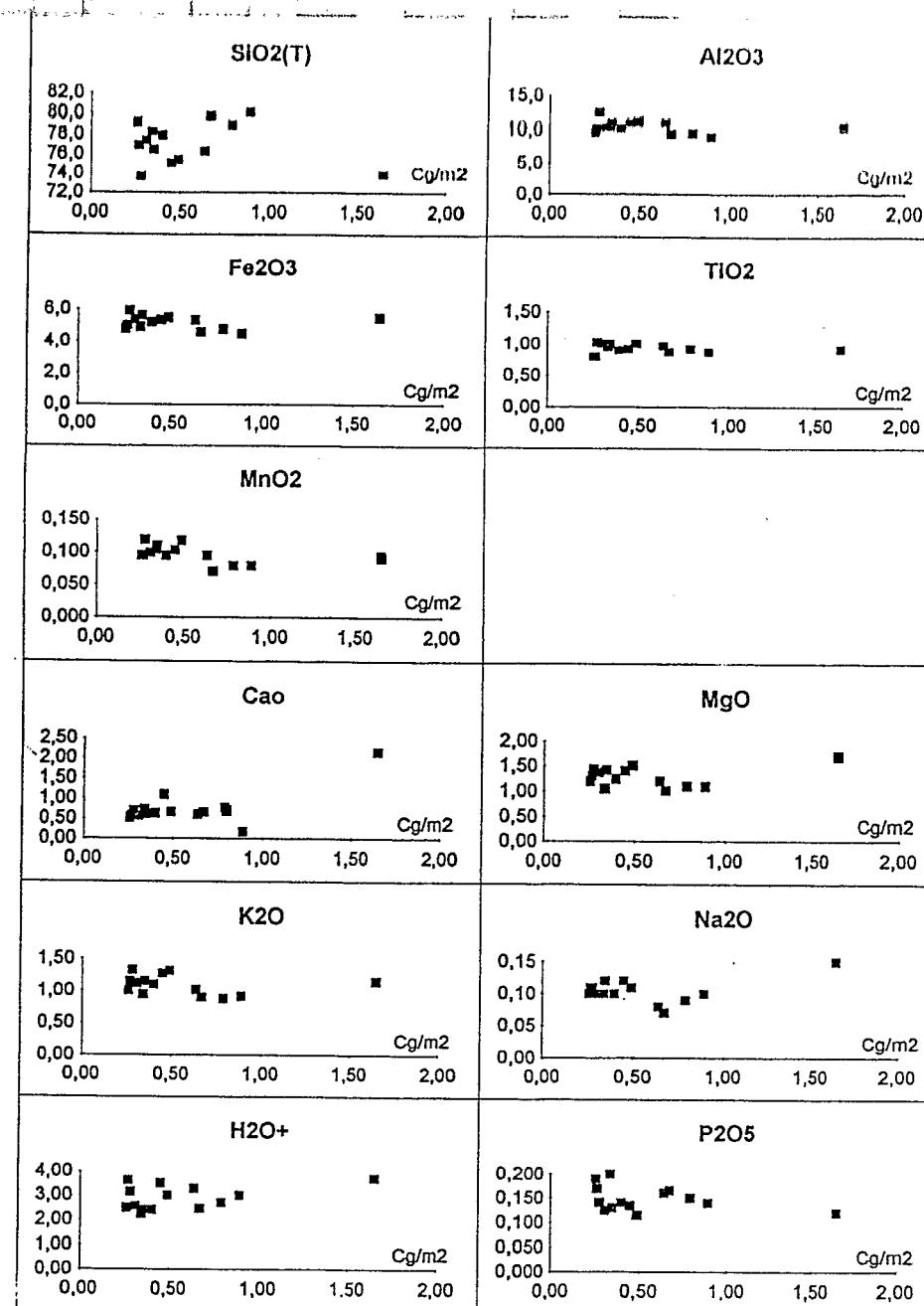
Année	J	F	H	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Hoyenne
DAKAR													
1984	1,03	1,62	1,11	0,65	1,17	-	-	-	-	0,46	0,66	(0,74)	
1985	0,88	1,53	0,93	1,10	0,70	0,93	0,29	0,14	0,29	0,38	0,32	0,47	0,66
1986	0,89	0,54	1,16	0,56	0,50	0,52	0,21	0,39	0,21	0,48	0,35	0,40	0,52
1987	0,30	0,52	0,85	0,96	1,18	0,43	0,39	0,29	0,35	0,37	0,18	0,37	0,52
1988	0,93	0,87	0,66	0,42	0,53	0,52	0,22	0,16	0,15	0,18	0,17	0,22	0,50
1989	0,36	0,86	0,60	0,65	0,72	0,80	0,22	0,13	0,16	0,15	0,16	0,25	0,42
Moyenne	0,73	0,99	0,88	0,72	0,80	0,64	0,27	0,22	0,23	0,31	0,27	0,40	0,54
MBOUR													
1986	0,29	0,24	0,35	0,31	0,51	0,52	0,20	0,48	0,20	0,31	0,22	0,26	0,32
1987	0,21	0,33	0,54	0,86	1,72	0,62	0,40	0,27	0,29	0,32	0,11	0,23	0,49
MGNITH													
1987	-	-	-	-	-	-	0,32	0,18	0,18	0,29	0,16	0,35	-
1988	0,67	0,56	0,62	0,38	0,38	0,47	0,30	0,05	0,09	0,15	0,14	0,22	0,34
1989	0,36	0,47	0,43	0,42	0,31	0,47	0,14	0,06	0,10	0,16	0,24	0,30	0,29
KEDOUGOU													
1987	-	-	-	-	-	0,08	0,06	0,06	0,03	0,04	0,06	-	-
PETE													
1986	-	0,40	0,45	0,28	0,49	0,35	0,31	-	-	0,27	0,26	0,64	0,38

() : valeur annuelle estimée.

Figure 3 : Evolution des teneurs moyennes mensuelles à Dakar en fonction de l'intensité du dépôt



Figures 4 et 5 : Evolution des teneurs moyennes mensuelles à Pété et à Mbour en fonction de l'intensité du dépôt



4) Calculs des facteurs d'enrichissement des eaux de pluie de Bakel (NE du Sénégal) par les poussières atmosphériques

Trois facteurs d'enrichissement des eaux de pluie par les poussières atmosphériques sont testés ici, seul celui défini dans le tableau 7 a été retenu dans l'article qui suit en annexe.

Les chlorures et les sulfates sont utilisés pour caractériser l'origine marine des masses d'eau de pluie. La teneur référence est fixée dans un premier essai à la teneur enregistrée dans l'océan (tableau 7), dans les deux essais suivants à la teneur enregistrée dans les eaux de pluie du mois d'août de Bakel (tableaux 8 et 9). Le mois d'août a été choisi car il est le mois le plus pluvieux, on peut donc supposer que ce mois-là l'influence des poussières atmosphériques est négligeable.

Tableau 7 : Facteurs d'enrichissement par rapport aux chlorures (le signal de base étant les chlorures de l'océan)

Tableau 8 : Facteurs d'enrichissement par rapport aux chlorures (le signal de base étant les chlorures enregistrés en août à Bakel)

Philippe Bakel 1983

	Bakell	Datar	Bakel
	TDS	Cg/m ²	Pmm
JIN	52,7	0,57	73
UJIL	-3,9	0,28	25
ACIUT	12,4	0,26	172
EDT	-6,2	0,24	38
CITO	35,1	0,38	12

$$E_d = (X/Cl)i/(X/Cl)a_{out} - 1$$

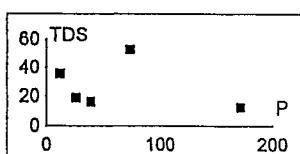
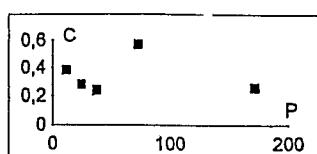
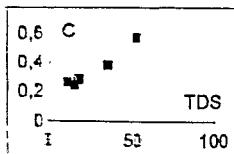
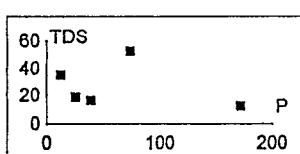
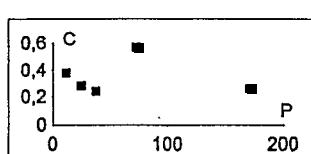
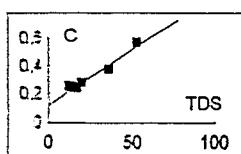


Tableau 9 : Facteurs d'enrichissement par rapport à la somme Cl+SO₄ (le signal de base étant enregistré en août à Bakel)

Stuie Bakel 1983

<u>Baked</u>	<u>Dates</u>	<u>Baked</u>
TDS	Cg/m2	Pmm
JUN 52.7	0.57	73
JUL 13.9	0.28	25
AUG 12.4	0.26	172
SEPT 16.2	0.24	38
OCTO 35.1	0.38	12

$$E_{de} = \frac{\left(\frac{x}{d+s_0 u_i}\right)_i}{\left(\frac{x}{d+s_0 u_i}\right)_b} - 1$$



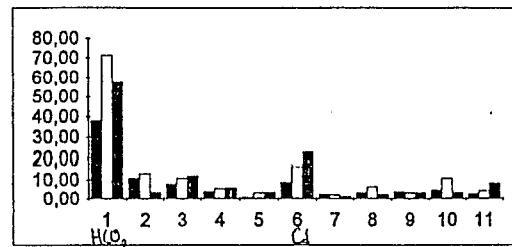
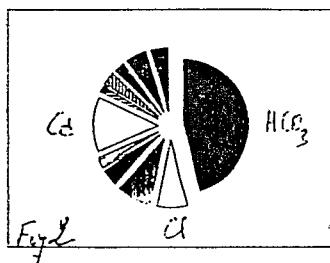
5) Bilan géochimique des apports atmosphériques

Composition chimique moyenne des pluies (orange, 1992)

Flux calculés pour 700 mm de pluie par an.

$$F = \text{Vol} \times \text{Masse} = (700 \text{ mm} \times 1 \text{ ha}) \times X \text{ mg/l} = (7000 \text{ m}^3) \times (X \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3) = 7 \times X \text{ kg/ha/yr}$$

P(mm)	Qualité chimique				Flux chimique			
	sah	soud	guin	MOY	sah	soud	guin	MOY
400	1100	1200	700	700	400	1100	1200	700
mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	kg/ha/yr	kg/ha/yr	kg/ha/yr	kg/ha/yr	kg/ha/yr
HCO ₃	9,5	6,5	4,8	6,2	38,00	71,50	57,60	43,32
Cl	2,7	1,2	0,3	1,0	10,80	13,20	3,60	7,16
SO ₄	2,0	1,0	1,0	1,1	8,00	11,00	12,00	8,04
NO ₃	1,0	0,5	0,5	0,6	4,00	5,50	6,00	4,02
PO ₄	0,2	0,3	0,3	0,3	0,80	3,30	3,60	2,00
C ₂	2,2	1,5	1,9	1,8	8,80	16,50	22,80	12,47
Mg	0,6	0,2	0,1	0,2	2,40	2,20	1,20	1,50
K	0,9	0,6	0,2	0,5	3,80	6,60	2,40	3,27
Na	1,0	0,3	0,3	0,4	4,00	3,30	3,60	2,83
NH ₄	1,2	1,0	0,3	0,7	4,80	11,00	3,60	5,03
SiO ₂	0,7	0,4	0,7	0,6	2,80	4,40	8,40	4,04
Total	22,0	13,5	10,4	13,4	88,0	148,5	124,8	93,7



Composition chimique moyenne des dust (orange, 1992)

Dust	Flux chimique					Flux chimique				
	sah	soud	guin	MOY	MOY	sah	soud	guin	MOY	MOY
C(g/m ²)	200	120	40	105	160	120	72	24	72	72
d(g/cm ³)	1,5	1,5	1,5	1,5	2	2	2	2	2	2
e(mm/yr)	0,133	0,080	0,027	0,070	0,080	0,060	0,036	0,012	0,036	0,036
% oxyde	kg/ha/yr	kg/ha/yr	kg/ha/yr	kg/ha/yr	kg/ha/yr	kg/ha/yr	kg/ha/yr	kg/ha/yr	kg/ha/yr	kg/ha/yr
SiO ₂ (T)	75,7	1514,7	908,8	302,9	795,2	1211,8	908,8	545,3	181,8	545,3
Al ₂ O ₃	10,7	213,1	127,8	42,6	111,9	170,5	127,8	76,7	25,6	76,7
Fe ₂ O ₃	5,2	104,9	62,9	21,0	55,1	83,9	62,9	37,8	12,6	37,8
TiO ₂	0,90	17,9	10,7	3,6	9,4	14,3	10,7	6,4	2,1	6,4
MnO ₂	0,088	1,8	1,1	0,4	0,9	1,4	1,1	0,8	0,2	0,6
P ₂ O ₅	0,202	4,0	2,4	0,8	2,1	3,2	2,4	1,5	0,5	1,5
CaO	1,37	27,3	16,4	5,5	14,3	21,9	16,4	9,8	3,3	9,8
MgO	1,43	28,8	17,1	5,7	15,0	22,9	17,1	10,3	3,4	10,3
K ₂ O	1,29	25,7	15,4	5,1	13,5	20,6	15,4	9,3	3,1	9,3
Na ₂ O	0,34	6,7	4,0	1,3	3,5	5,4	4,0	2,4	0,8	2,4
Total	1944,8	1186,9	389,0	1021,0	1555,8	1166,9	700,1	233,4	700,1	700,1

Geochemical balance of atmospheric inputs in continental West Africa (in kg/ha/yr)

	Flux dissous			
	sah	soud	guin	MOY
P(mm)	400	1100	1200	700
	kg/ha/yr	kg/ha/yr	kg/ha/yr	kg/ha/yr
HCO ₃	38,00	71,50	57,60	43,32
Cl	10,50	13,20	3,60	7,18
SO ₄	8,00	11,00	12,00	8,04
NO ₃	4,00	5,50	8,00	4,02
PO ₄	0,80	3,30	3,60	2,00
Ca	8,80	16,50	22,80	12,47
Mg	2,40	2,20	1,20	1,50
K	3,60	6,60	2,40	3,27
Na	4,00	3,30	3,60	2,83
NH ₄	4,80	11,00	3,60	5,03
SiO ₂	2,80	4,40	8,40	4,04
Total	88,00	148,50	124,80	93,87

	Flux particulaire			
	sah	soud	guin	MOY
Cd(g/m ²)	200	120	40	210
Ce(g/m ²)	120	72	24	126
d(g/cm ³)	1,8	1,8	1,8	1,8
e(mm/yr)	0,067	0,040	0,013	0,070
	kg/ha/yr	kg/ha/yr	kg/ha/yr	kg/ha/yr
SiO ₂ (T)	908,8	545,3	181,8	954,3
Al ₂ O ₃	127,8	76,7	25,6	134,2
Fe ₂ O ₃	62,9	37,8	12,8	66,1
TiO ₂	10,7	8,4	2,1	11,3
MnO ₂	1,1	0,6	0,2	1,1
P ₂ O ₅	2,4	1,5	0,5	2,5
CaO	18,4	9,8	3,3	17,2
MgO	17,1	10,3	3,4	18,0
K ₂ O	15,4	9,3	3,1	16,2
Na ₂ O	4,0	2,4	0,8	4,3

	Flux dissous			
	sah	soud	guin	
	kg/ha/yr	kg/ha/yr	kg/ha/yr	
HCC ₃	38,0	71,5	57,6	
Cl	10,8	13,2	3,6	
N	4,8	9,8	4,2	
S	2,7	3,7	4,0	
P	0,3	1,1	1,2	
Na	4,0	3,3	3,6	
Ca	8,8	16,5	22,8	
K	3,6	6,6	2,4	
Mg	2,4	2,2	1,2	
Si	1,3	2,1	3,9	
Al				
Fe				
Ti				
Mn				

	Flux particulaire			W Africa
	sah	soud	guin	Ftotal
	kg/ha/yr	kg/ha/yr	kg/ha/yr	kg/ha/yr
				71,5
				13,2
				9,8
				3,7
				1,4
				4,2
				23,5
				10,4
				8,4
				257,0
				20,3
				13,2
				3,9
				0,4

Cd : dépôt de poussières mesuré ;

Ce : dépôt de poussières restant au sol après la remobilisation par le vent.

6) Quelques remarques

1. La diminution des teneurs en sodium entre les échantillons D5 et D6 (Dakar en août et septembre 1986) est inexplicable ! ? Par contre, la diminution des teneurs en potassium enregistrée entre les échantillons de Dakar de mars et avril 1986 correspond au changement de laboratoire d'analyse !!! (tableau 1)

2. Pour les événements de dépôts les plus importants à Dakar, la silice augmente alors que l'alumine et les oxydes de Ti et Mn diminuent nettement ; les autres oxydes de Fe, Ca, Mg et P semblent légèrement diminuer (figure 1).

3. Alors que de 1983 à 1987 à Dakar, le dépôt moyen annuel de poussières semble diminuer, les teneurs des poussières en silice, en oxydes de Fe, Mg, Ca et P augmentent (figure 2). Les baisses de teneurs en oxydes de K et Na peuvent être dues à des difficultés d'analyse.

4. L'évolution des teneurs moyennes mensuelles des poussières déposées à Dakar montre que les oxydes de P, Fe, Mg, Ca et dans une moindre mesure Ti et Al diminuent avec l'augmentation du dépôt ; à l'opposé, la silice semble augmenter (figure 3). A Mbour, l'évolution est similaire alors que rien de significatif n'apparaît sur les résultats de Pété (figures 4 et 5).

5. Les tableaux 8 et 9 prouvent que les eaux de pluie ont leur composition chimique modifiée même lors du mois d'août, en pleine saison des pluies !

7) Annexe : article pour l'IAHS Symposium de juillet 1993 au Japon

Name : ORANGE Didier

Title : Constituent composition of Harmattan dust and geochemical balance of atmospheric depositions in continental West Africa

Full postal address : ORSTOM, BP 893, Bangui, République Centrafricaine

Telephone : (236) 61 20 89

Fax : (236) 61 68 29

version une 16p

HZ

Constituent composition of Harmattan dust and geochemical balance of atmospheric depositions in continental West Africa

D. ORANGE,

Laiboratoire d'Hydrologie, ORSTOM, BP 893, Bangui, République Centrafricaine

J.Y. GAC,

Laiboratoire de Géologie, ORSTOM, BP 1386, Dakar, Sénégal

M.I. DIALLO,

Département de Géographie, Université de Dakar, Sénégal

Abstract - In West Africa, atmospheric dusts, corresponding to the Saharian dust particles brought by Harmattan wind, represent a seasonal climatic event as rainy season. They are constituted basically by silt fraction and about 75% of their total deposited mass are formed by silica. The strong sensibility of calcium contents allows to use this element as tracer of source regions. Phosphate is only chemical specy with a seasonal behaviour. The atmospheric dusts modify the chemical quality of rain waters which are alkaline and strongly mineralized. A geochemical balance of atmospheric inputs is established by continental West African climatic zone. It reveals the existence of an African chemical signature of the atmospheric fluxes which represent a contribution in order from 1300 kg/ha/yr in sahelian zone to 365 kg/ha/yr in guinean zone. Silicium represents always the third of the total atmospheric inputs. On the other hand, there are different distributions of chemical species between the two forms of atmospheric inputs according to the climatic zone. Over the whole continental West Africa, the geochemical balance of dry and wet deposits is in the following order : Si >> HCO_3^- > Ca > Al > Fe > Cl > K > N > Mg > (Na > Ti > S > P > Mn).

INTRODUCTION

During the last decade, many studies have shown the importance of atmospheric dust transport above African continent and their influence on the climate (D'Almeida, 1986, 1989 ; Tsoar & Pye, 1987 ; Bergametti *et al.*, 1989 ; Joussaume, 1990 ; Legrand, 1990). The present article concerns the role of atmospheric dust on the chemical properties of rain water in continental West Africa and the results on the geochemical balance of atmospheric inputs. In first, we determine the characteristics and constituent composition of the Harmattan dust falling in West Africa. After, we compare these with the rain water chemistry. And in conclusion, a geochemical balance of wet and dry atmospheric inputs in continental West Africa is established.

Daily measurements of dust deposition were performed in few points of Senegal country from 1984 to 1989 by ORSTOM. It has been already shown that in West Africa

atmospheric dust is an important seasonal climatic event as rainy season (Orange & Gac, 1990 ; Orange, 1992). Their depositions vary between about 200 g/m²/y in the sahelian zone and about 40 g/m²/y in the guinean zone, with at least 40% of these dust inputs which are remobilized by the wind. Their contribution to input-output sediment budget seems negligible and does not change the mechanical erosion balance. But their impact is important in the chemical weathering budget because they modify the chemical quality of rain waters. Indeed the dust deposition is not insignificant during the wet season : it represents 25% of the total annual dust flux.

MATERIALS AND METHODS

Collecting systems of atmospheric dust have been set in three points of the Senegal (Fig. 1). This material is presented in Orange *et al.* (1990). It is a simple pyramidal receptacle of 40 cm of depth and 0.25 cm² of collecting surface, located at 5 m above the ground and it delivers deposited dust into a collecting bottle when daily washed with distilled water. The samples are hence filtered on 0.45 µm pore-size filters, dried up at 70°C and weighted.

For the chemical analysis of the dust depositions, the samples have been collected together by month. There were 42 analysis results for Dakar from 1984 to 1987, 20 for Mbour, 80 km southwards on the Atlantic coast, from 1986 to 1987, and 14 for Pete, 400 km eastwards into the continental sahelian zone, from 1986 to 1987.

Samples of rain waters have been collected in two points of Senegal, at Bakel into the sahelian zone during the 1983 rainy season and at Kedougou into the sudanian zone during the 1987 rainy season (Fig. 1). The sampling method and the results of chemical analysis have been previously presented in Orange & Gac (1990).

CONSTITUENT COMPOSITION OF HARMATTAN DUST

The analysed material is basically represented by silt fraction. Size distribution measurements of atmospheric dust from Dakar have shown that 91% of particles have a diameter between 2 and 50 µm, 6.5% have a diameter below 2 µm and only 2.5% represent the sand fraction.

The annual means have been calculated weighting the monthly analysis results by the monthly average of daily dust deposition. The interannual mean is calculated by simple arithmetical average.

For each station, the annual means of dust chemical composition show a large stability. So the interannual means are characteristics of each station. There are not big variations between the three stations. The atmospheric dust is always basically siliceous. Silica is expressed in quartz (about 60%) or integrated in clay minerals (from 15 to 20%) (Orange,

1992). The most abundant oxydes after silica are always Al_2O_3 (about 10%) and Fe_2O_3 (about 5%).

Comparitively to the soil chemical composition of this geographical zone (Moberg *et al.*, 1991), atmospheric dust is more siliceous, less aluminous and equal ferrous. Furthermore, atmospheric dusts are very enriched in calcium, magnesium, potassium and sodium. So dusts are a source of cations, as West Africa soils are cations depleted.

In details, there are small differences of chemical species behaviour between dust collected in Dakar, very inhabited coast city, Mbour, a small coast city, and Pete, a small continental city. At Dakar, silica is less abundant. The results of the X-ray diffraction analysis show that this missing part of silica corresponds to the quartz fraction. On the other hand, oxydes of calcium, potassium and sodium are more abundant, except magnesium oxyde. These three chemical species seem to be linked to a human pollution. At last, we note the weak content of phosphorus in the dust from Pete in comparison of the two other sampling points. Phosphorus can be used as a tracer of dusts falling over area close to the coast.

The chemical composition of atmospheric dust does not show variation according to season. In Dakar, silica seems less important during wet season, but it is not confirmed by the two other sampling stations. Phosphorus is the only chemical specy having an annual cyclic evolution. Its high contents during wet season are accounted for by organic matter burning. Indeed biological emissions as particulate from vegetation are the major sources of phosphorus to the atmosphere (Stallard & Edmond, 1981).

In terms of monthly variability, the most variable chemical species are in decreasing order Na_2O , P_2O_5 , K_2O , CaO at Dakar, P_2O_5 , CaO , Na_2O at Mbour and CaO at Pete. Their standard deviation is superior at 20% (table 3). The fact that calcium is the only chemical specy variable at each station, notes the large contribution of calcareous encrusting for the atmospheric dust generation (Paquet *et al.*, 1984 ; Loÿe-Pilot *et al.*, 1986 ; Coudé-Gaussien, 1989 ; Clarke & Karani, 1992). This element can be used as tracer of source regions.

We have no explication for the strong variability of sodium and potassium in dust composition. Their low level of concentration can be at the origin of analytical problems. The comparison with bibliographic data does not allow to supply a solution (Moberg *et al.*, 1991).

CHEMICAL PROPERTIES OF RAIN WATERS

In comparison with the world average, rain waters of continental sahelo-sudano-guinean zones are strongly mineralized (from 10 mg/l to 50 mg/l) and contain bicarbonates and calcium (Mathieu, 1976 ; Roose, 1980 ; Lewis, 1981 ; Travi *et al.*, 1987 ; Orange & Gac, 1990 ; Yaïr *et al.*, 1991). Orange & Gac (1990) have shown that dissolved matter contents increase with increasing aridity and encounter of cloud masses of the monsoon with the Harmattan winds

which are charged with dust particles. Furthermore the pH is slightly alkaline. In this geographical country characterized by savannah, the incorporation into rain water of Harmattan dust counteract the effect of acidic rain noted in tropical forest, southwards of our study region (Loë-Pilot *et al.*, 1986 ; Jaffrezo, 1987 ; Lacaux *et al.*, 1987 ; Caboi *et al.*, 1992).

At Bakel, the highest concentrations are observed at the beginning and at the end of the rainfall season ; a decrease in rain concentrations is observed during wet season (table 4). So, precipitations play a significant role in the self-cleaning of the atmosphere. This phenomenon was noted previously by several studies (Buat-Ménard *et al.*, 1974 ; Lewis, 1981 ; Jaffrezo, 1987 ; Orange & Gac, 1990).

For silica dissolved in rain water, the contribution of atmospheric dust is obvious. For the other chemical species, to characterize the load increasing due to the flushing of the dust suspended in the lower atmosphere, we use an enrichment factor noted $E_d(X)$ of any chemical element X in rain water by the dust, defined as :

$$E_d(X) = [(C_X/C_{Cl})_{rain} / (C_X/C_{Cl})_{ocean}] - 1$$

where C_X is the concentration of the element X, C_{Cl} is the concentration of chloride used as reference. Indeed chloride characterizes the marine source in agreement with previous studies (Stallard & Edmond, 1981 ; Meybeck, 1984). If $E_d(X)$ is negative, then the chemical specy X is enriched in rain water. We have used the C_X/C_{Cl} ratio given by Savenko (1976).

The results (table 5) show that the enrichment is stronger in June and October. Magnesium is enriched only in June while bicarbonate, calcium and potassium are enriched during the whole wet season. Bicarbonate is the chemical specy the most enriched. We see again here the importance of calcareous encrusting in the rainfall chemistry. We have no data concerning phosphate and nitrate. In conclusion, results from rain chemistry show the relative importance between wet and dry atmospheric inputs.

GEOCHEMICAL BALANCE OF ATMOSPHERIC DEPOSITIONS

The uniformity of chemical composition of West African rainfall and atmospheric dust noted by bibliographic study of Orange & Gac (1990) allow to calculate geochemical balance of atmospheric depositions by using data collected in three typical points of each concerned climatic zone : sahelian, sudanian and guinean zones.

The average chemical composition of dissolved atmospheric inputs in continental West Africa has been estimated from the chemical composition of rain waters collected in sahelian zone (at Bakel), in sudanian zone (at Kedougou) and in guinean zone (at Korhogo, Ivory Coast (Roose, 1980)) weighted by rainfall amount of each station (Orange, 1992) (table 6).

The total load of dissolved inputs in continental West Africa is about 13 mg/l. In terms of equivalents, the order of total annual loads for soluble cations is Ca>NH₄>Mg>Na>K. For soluble anions, the order of load is HCO₃>Cl>SO₄>NO₃>PO₄. Soluble silicon load is low but superior at the world average. Bicarbonate is largely the major ionic specy (Fig. 2). Lewis (1981) gives the same order for the total annual load of soluble anions in a tropical watershed of Venezuela with a similar environment. For the soluble cations, the relative contribution of calcium and ammonium is more important in our study, because of the large part of Harmattan dust in the continental West African atmospheric inputs.

The particulate inputs are calculated by arithmetical average from the average chemical composition of dust collected at Dakar, Mbour and Pete. The result has already been presented in table 2.

The geochemical balances of atmospheric inputs are calculated by using the results of the hydroclimatic study about West Africa done by Orange (1992). For the present period, the average annual rainfall amount is about 400 mm/yr in sahelian zone, 1100 mm/yr in sudanian zone and 1200 mm/yr in guinean zone. With a remobilization rate of 40% (Orange, 1992), the mean annual deposition of atmospheric dust is estimated at 120 g/m² in sahelian zone, 70 g/m² in sudanian zone and 25 g/m² in guinean zone.

The results show that the atmospheric dusts constitute always the major part of atmospheric inputs whatever continental West African climatic zones (Fig. 3). Their contribution is the most important in sahelian zone, where they represent 93% of the total inputs. In sudanian zone, their contribution goes down to 83% of the total inputs and in guinean zone they fall to 66% only of the total inputs. So in continental West Africa, the inputs of atmospheric dust represent between 2 and 14 times the inputs of rainwater.

In term of mass balance, the flux of atmospheric inputs is the most important in sahelian zone, because of the strong contribution of dust particles to the total atmospheric inputs in this climatic zone. It is about 1288 kg/ha/yr in sahelian zone while it is only about 365 kg/ha/yr in guinean zone ; that represents a variation of 72% between these two West African extremes. In sudanian zone, the total atmospheric inputs amount to 868 kg/ha/yr.

The distribution between dissolved and particulate chemical species is presented in table 7. Inorganic carbon, being only in the bicarbonate form, chlore, nitrogen and sulphur are brought into the landscape exclusively in dissolved form. Phosphorus, sodium, calcium, potassium, magnesium and silicium are represented in the two forms of inputs (wet and dry) with different distributions according to climatic zone. For instance, calcium is principally brought in particulate form in sahelian zone while it is above all brought in dissolved form in guinean zone. The silicium is always present especially in particulate form. Finally, aluminium, iron, titanium and manganese are exclusively in particulate form.

In details, the mass contribution of chemical species is function of the climatic zone because of different distributions between wet and dry atmospheric inputs according to climatic zone (table 7). However, the succession of main chemical species brought by the atmospheric inputs is the same whatever the climatic zone : Si, HCO_3 , Ca, Al, Fe. The silicium is always the most abundant chemical element brought into the continental West African landscape ; it represents always about the third of the atmospheric inputs. After the silicium, we find always in the decreasing order the bicarbonate. Its contribution into the whole atmospheric inputs varies from 3% in sahelian zone to 16% in guinean zone. Then calcium is more or less abundant than aluminium and iron according to the importance of the part of atmospheric dust into the whole atmospheric inputs. In sahelian zone, aluminium and iron mass fluxes are superior than calcium mass flux, and inversely in sudanian and guinean zones (table 7). For the other analysed chemical species, there is no characteristic order. We note only the strong variability of nitrogen inputs between the three climatic zones. From 0.8% of the total atmospheric inputs in sahelian zone, they amount to 20% of them in sudanian and guinean zones.

At last, in conclusion, table 7 gives an estimation of the mass contribution for each chemical specy over the continental West Africa. This global balance has been established regarding the sudanian zone as representative of West Africa. The flux of total atmospheric inputs over the continental West Africa amounts to about $850 \pm 50 \text{ kg/ha/yr}$, with one third represented by silicium. The chemical mass balance of dry and wet atmospheric inputs in continental West Africa is in the following order : Si > HCO_3 > Ca > Al > Fe > Cl > K > N > Mg (> Na > Ti > S > P > Mn).

CONCLUSIONS

The geochemical balance of atmospheric depositions underlines the importance of Harmattan dust in continental West Africa. Wet precipitations playing a significant role in the self-cleaning of the atmosphere, the water soluble fraction of the tropospheric aerosols governs the dissolved salts contents of rain waters.

The chemical analysis of atmospheric dust falling in Senegal has shown that there are not big variations of chemical composition over the whole studied zone. The atmospheric dust is always basically constituted by silt fraction and silica represents 75% of the total mass deposited on the ground. It appears also that dusts are a source of cations for the soil formation. In the main, there is no variation of the chemical composition according to the season ; phosphorus is the only chemical specy having an annual cyclic evolution due to the cyclic vegetation behaviour. At last, this study notes the large sensibility of particulate calcium to trace the source regions.

The impact of atmospheric dusts is important in the chemical weathering budget of West African landscapes, because they modify the chemical quality of rain waters and so the chemistry of surface waters. The enrichment, especially in bicarbonate, calcium, potassium and silicium, due to the flushing of the dust particles suspended in the lower atmosphere is the highest at the beginning and at the end of the wet season. Bicarbonate is the chemical specy the most enriched.

The atmospheric dusts constitute always the major part of atmospheric inputs whichever continental West African climatic zones. The flux of atmospheric inputs is the most important in sahelian zone ; there is a variation of 72% between the two extreme West African climatic zones. Phosphorus, sodium, calcium, potassium, magnesium and silicium are represented in the two forms of inputs (wet and dry) with different distributions according to climatic zone. Of course, silicium is always present especially in particulate form. The succession of main chemical species brought by the atmospheric inputs is the same whatever the climatic zone : Si, HCO_3 , Ca, Al, Fe. The flux of total atmospheric inputs over the continental West Africa amounts to about $850 \pm 50 \text{ kg/ha/yr}$, with one third represented by silicium.

These results underline the impact of atmospheric dust on the chemistry of surface waters. Indeed playing an important role on the chemical composition of rain waters, the knowledge of the Harmattan dust geochemistry is necessary to understand the present chemical weathering of West Africa landscapes.

Acknowledgements - This paper is an expanded version of a part of a doctoral thesis written in the Geological Laboratory of ORSTOM in Dakar (Senegal) and in the *Centre de Géochimie de la Surface (CGS)* of CNRS in Strasbourg (France). Special thanks are due to J. Gautheyrou from the *Laboratoires des Formations Superficielles* of ORSTOM at Bondy (France) for the analysis of atmospheric dust collected on 1986 and 1987, to H. Paquet from the *Centre de Géochimie de la Surface* of CNRS at Strasbourg (France) for the analysis of atmospheric dust collected on 1984 and 1985, and G. Krempp from the *Centre de Géochimie de la Surface* of CNRS at Strasbourg (France) for rain water analysis.

REFERENCES

- Bergametti G., Gomes L., Remoudaki E., Desbois M., Martin D., Buat-Ménard P. (1989) - Present transport and deposition patterns of African dusts to the north-western Mediterranean. *Paleoclimatology and Paleometeorology : Modern and Past Patterns of Global Atmospheric Transport*, Leinen and Sarnthein Eds, 227-252.

- Buat-Ménard P., Morelli J., Chesselet R. (1974) - Water-soluble elements in atmospheric particulate matter over tropical and equatorial Atlantic. *J. de Rech. Atm.*, CNRS Ed. VIII(3-4), 661-672.
- Caboi R., Cidu R., Cristini A., Fanfani L., Zuddas P. (1992) - Influence of Saharian dust and marine spray on the chemical composition of rain in Sardinia, Italy. *Water-Rock Interaction*, Kharaka & Maest Eds, Balkema, USA, 469-472.
- Clarke A.G., Karani G.N. (1992) - Characterisation of the carbonate content of atmospheric aerosols. *J. Atm. Chem.* 14, 119-128.
- Coudé-Gaussen G. (1989) - Les poussières sahariennes et leur contribution aux sédimentations désertiques et péri-désertiques. *Thèse Lettres, Géographie*, univ. Paris VI, 715 p.
- D'Almeida G.A. (1986) - A model for Saharan dust transport. *J. Climate and Appl. Meteo.* 25(7), 903-916.
- D'Almeida G.A. (1989) - Desert aerosol : characteristics and effects on climate. In : *Paleoclimatology and Paleometeorology : Modern and Past Patterns of Global Atmospheric Transport*, Leinen and Sarnthein Eds, 311-338.
- Jaffrezo J.L. (1987) - Etude du lessivage des aérosols atmosphériques par les précipitations. *Thèse Sciences, Chimie de la pollution*, univ. Paris VII, 164 p.
- Joussaume S. (1990) - Three-dimensional simulations of the atmospheric cycle of desert dust particles using a General Circulation Model. *J. Geophys. Res.* 95(D2), 1909-1941.
- Lacaux J.P., Servant J., Baudet J.G.R. (1987) - Acid rain in the tropical forests of the Ivory Coast. *Atm. Env.* 21(12), 2643-2647.
- Legrand M. (1990) - Etude des aérosols sahariens au-dessus de l'Afrique à l'aide du canal à 10 microns de Météosat : visualisation, interprétation et modélisation. *Thèse Sciences, Physique*, univ. Lille, 200 p.
- Lewis W.M. (1981) - Precipitation chemistry and nutrient loading by precipitation in a tropical watershed. *Wat. Resour. Res.* 17, 169-181.
- Loÿe-Pilot M.D., Martin J.M., Morelli J. (1986) - Influence of saharan dust on the rain acidity and atmospheric input to the mediterranean. *Nature* 321, 427-428.
- Mathieu P. (1976) - Influence des apports atmosphériques et du pluviolessivage forestier sur la qualité des eaux de deux bassins versants en Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM*, sér. Géol., Paris, VIII, 11-32.
- Meybeck M. (1984) - Les fleuves et le cycle géochimique des éléments. *Thèse Sciences, Géologie*, univ. Paris VI, 558 p.
- Moberg J.P., Esu I.E., Malgwi W.B. (1991) - Characteristics and constituent composition of Harmattan dust falling in Northern Nigeria. *Geoderma* 48, 73-81.

- 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*, ORSTOM, Paris, 5(1), 51-65.
- Orange D. (1992) - Hydroclimatologie du Fouta-Djalon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique (Afrique de l'Ouest). *Mém. Sc. Géol.*, Strasbourg, 194 p.
- Paquet H., Coudé-Gaussen 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.* 25, 257-265.
- Roose E. (1980) - Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. *Thèse Sciences, Géologie*, univ. Orléans, 587 p.
- Sæverko V.S. (1976) - The chemical composition of precipitation over the oceans. *Geochem. Int.* 13(6), 181-184.
- Stallard R.F., Edmond J.M. (1981) - Geochemistry of the Amazon. 1. Precipitation chemistry and the marine contribution to the dissolved load at the time of peak discharge. *J. Geophys. Res.* 86(C₁₀), 9844-9858.
- 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, 1-11.
- Tsoar H., Pye K. (1987) - Dust transport and the question of desert loess formation. *Sedimentology* 34, 139-153.
- Yair A., Karniel A., Issar A. (1991) - The chemical composition of precipitation and runoff water on an arid limestone hillside, northern Negev, Israël. *J. Hydrol.* 129, 371-388.

LIST OF TABLES

Table 1 Annual mean chemical composition of atmospheric dust collected in Senegal (in % oxides).

Table 2 Geochemistry of atmospheric dustfall in West Africa and average chemical composition of a well-drained soil of Northern Nigeria (in % oxides).

Table 3 Variability of chemical species of atmospheric dust collected in Senegal (in % standard deviation).

Table 4 Monthly chemical composition (in $\mu\text{eq/l}$) of rain waters collected at Bakel.

Table 5 Enrichment factors E_d of chemical major elements of rainfall collected at Bakel.

Table 6 Average chemical composition (in mg/l) of dissolved atmospheric inputs in sahelian, sudanian and guinean climatic zones.

Table 7 Geochemical balance of atmospheric inputs in continental West Africa (in kg/ha/yr).

FIGURE CAPTION

Fig. 1 Geographical location of the sampling area.

Fig. 2 Geochemical feature of rain waters in continental West Africa.

Fig. 3 Contribution of dry and wet atmospheric inputs in continental West Africa (in kg/ha/yr) (F_t , total flux of atmospheric inputs ; contribution of dust deposition in per cent).

Tchiré I Annual Input Chemical of dust for the period 1984-1987 (in kg ha⁻¹ yr⁻¹)

Station	DAKAR						MBOUR						PETE					
	Year n	1984 9	1985 12	1986 12	1987 9	M 42	+/-	SD	1986 12	1987 8	M 20	+/-	SD	1986 9	1987 5	M 14	+/-	SD
SiO ₂	74.3	72.0	74.2	74.7	73.8	+/-	2.8	75.9	77.2	76.5	+/-	2.6	76.3	77.3	76.8	+/-	2.0	
Al ₂ O ₃	12.6	12.9	11.3	9.5	11.6	+/-	1.9	10.5	9.6	10.1	+/-	1.5	10.8	9.8	10.3	+/-	0.9	
Fe ₂ O ₃	5.1	5.1	5.7	5.7	5.4	+/-	0.8	5.4	5.0	5.2	+/-	0.6	5.3	5.0	5.2	+/-	0.4	
TiO ₂	0.95	0.92	0.89	0.82	0.89	+/-	0.09	0.88	0.86	0.87	+/-	0.10	0.94	0.90	0.92	+/-	0.07	
MnO ₂	0.073	0.067	0.080	0.084	0.076	+/-	0.007	0.100	0.086	0.093	+/-	0.009	0.103	0.086	0.094	+/-	0.013	
P ₂ O ₅	0.224	0.215	0.262	0.276	0.244	+/-	0.121	0.248	0.191	0.219	+/-	0.076	0.143	0.143	0.143	+/-	0.025	
CaO	2.04	2.07	2.08	2.46	2.16	+/-	0.46	0.97	1.09	1.03	+/-	0.30	0.67	1.15	0.91	+/-	0.43	
MgO	1.47	1.50	1.53	1.54	1.51	+/-	0.16	1.51	1.39	1.45	+/-	0.21	1.34	1.31	1.33	+/-	0.19	
K ₂ O	2.20	2.21	1.57	1.01	1.75	+/-	0.59	1.05	1.02	1.04	+/-	0.12	1.16	1.00	1.08	+/-	0.14	
Na ₂ O	1.03	1.10	0.76	0.21	0.77	+/-	0.42	0.14	0.12	0.13	+/-	0.03	0.10	0.11	0.11	+/-	0.02	

n, number of analysed samples ; M, interannual mean ; SD, standard deviation.

Table 2 Geochemistry of atmospheric dustfall in West Africa and average chemical composition of a well-drained soil of Northern Nigeria (in % oxydes).

dust	soil (1)
SiO ₂	75.7
Al ₂ O ₃	10.7
Fe ₂ O ₃	5.2
TiO ₂	0.90
MnO ₂	0.088
P ₂ O ₅	0.202
CaO	1.37
MgO	1.43
K ₂ O	1.29
Na ₂ O	0.34
	0.03

(1) Moberg et al., 1991.

Table 3 Variability of chemical species of atmospheric dust collected in Senegal (in % standard deviation).

Station	Dakar	Mbour	Pete
SiO ₂	4	3	3
Al ₂ O ₃	17	14	8
Fe ₂ O ₃	14	12	8
TiO ₂	10	12	8
MnO ₂	9	10	14
P ₂ O ₅	50	35	17
CaO	21	29	48
MgO	10	14	14
K ₂ O	34	12	13
Na ₂ O	54	23	17

Table 4 Monthly chemical composition (in $\mu\text{eq/l}$) of rain waters collected at Bakel.

	June	July	August	September	October
Pp(mm)	73	25	172	38	12
Npp	4	1	9	5	3
HCO ₃	415	123	80	75	235
Cl	118	63	61	84	122
SO ₄	40	64	28	44	66
NO ₃	35	12	9	19	31
PO ₄	11	3	1	10	14
Ca	246	98	57	103	218
Mg	194	22	15	26	46
K	78	12	8	16	40
Na	149	15	16	34	49
NH ₄	1	110	70	46	109
H ₄ SiO ₄ μmol/l	40	4	3	8	20
TDS mg/l	52.7	18.9	12.4	16.2	35.1

Pp, amount of collected rain water in mm ; Npp, number of rainfalls ; TDS, Total Dissolved Solute in mg/l.

Table 5 Enrichment factors E_d of chemical major elements of rainfall collected at Bakel.

X	June	July	August	September	October
HCO ₃	151	84	56	38	83
SO ₄	0	2	0.3	0.5	0.5
Ca	15	11	6	8	12
Mg	7	0.6	0.2	0.5	0.8
K	20	5	3	5	9
Na	0.4	-0.7	-0.7	-0.6	-0.6

$$E_d = [(X/\text{Cl})_{\text{rain}} / (X/\text{Cl})_{\text{ocean}}] - 1.$$

Table 6 Average chemical composition (in mg/l) of dissolved atmospheric inputs in sahelian, sudanian and guinean climatic zones.

	sahelian zone	sudanian zone	guinean zone	continental West Africa
HCO ₃	9.5	6.5	4.8	6.2
Cl	2.7	1.2	0.3	1.0
SO ₄	2.0	1.0	1.0	1.1
NO ₃	1.0	0.5	0.5	0.6
PO ₄	0.2	0.3	0.3	0.3
Ca	2.2	1.5	1.9	1.8
Mg	0.6	0.2	0.1	0.2
K	0.9	0.6	0.2	0.5
Na	1.0	0.3	0.3	0.4
NH ₄	1.2	1.0	0.3	0.7
SiO ₂	0.7	0.4	0.7	0.6
TDS	22.0	13.5	10.4	13.4

TDS, Total Dissolved Solute in mg/l.

Table 7 Geochemical balance of atmospheric inputs in continental West Africa (in kg/ha/yr).

	sahelian zone		sudanian zone		guinean zone		continental West Africa
	F _d	F _p	F _d	F _p	F _d	F _p	F _{total}
wet only	HCO ₃	38.0		71.5		57.6	71.5
	Cl	10.8		13.2		3.6	13.2
	N	4.6		9.8		4.2	9.8
	S	2.7		3.7		4.0	3.7
wet and dry	P	0.3	0.5	1.1	0.3	1.2	0.1
	Na	4.0	1.5	3.3	0.9	3.6	0.3
	Ca	8.8	11.7	16.5	7.0	22.8	2.3
	K	3.6	6.4	6.6	3.8	2.4	1.3
	Mg	2.4	10.3	2.2	6.2	1.2	2.1
	Si	1.3	424.8	2.1	254.9	3.9	85.0
dry only	Al		33.8		20.3		6.8
	Fe		22.0		13.2		4.4
	Ti		6.4		3.9		1.3
	Mn		0.7		0.4		0.1

F_d, dissolved flux ; F_p, particulate flux.

