

Reconnaissance chimique et isotopique des eaux de pluie au Sénégal

Yves TRAVI⁽¹⁾, Jean-Yves GAC⁽²⁾
Jean-Charles FONTES⁽³⁾, Bertrand FRITZ⁽⁴⁾

Résumé : Dans le cadre d'une étude sur la composition chimique et isotopique des eaux de pluie au Sénégal, une première série de prélèvements a été réalisée au cours de la saison des pluies 1981. Les résultats analytiques obtenus pour huit stations, à partir d'une fraction aliquote d'échantillons mensuels cumulés, sont discutés et interprétés dans leur contexte hydroclimatique. Des sources différentes sont reconnues pour la vapeur génératrice des pluies de mousson et la charge saline apportée par les aérosols marins. Les précipitations apparaissent plus riches en sels que les eaux fluviales issues des hauts bassins du Sénégal et de la Gambie.

Mots-clés : Précipitations - Sénégal - Composition chimique et isotopes stables.

Abstract : Chemical and isotopic survey of rain waters in Senegal. A preliminary sampling has been carried out during the 1981 wet season within the framework of a chemical and isotopic survey of rain water in Senegal. Analytical results obtained on aliquote fractions of monthly samples from eight stations are discussed and interpreted in their hydroclimatic context. Different origins are identified for the atmospheric vapour which generates the monsoon rains and for the salts which are supplied by marine aerosols. Precipitations are richer in salts than stream waters issued from the highest parts of the basins of the Senegal and the Gambia rivers.

Key words : Precipitation - Senegal - Chemistry and stables isotopes.

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 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 (fig. 1). En 1982, tous les événements pluvieux ont donné lieu à 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 à Goulombou en 1983 et de nouveau à Dakar en 1984 et en 1985.

Outre l'aspect marquage initial isotopique et chimi-

(1) Département de Géologie, Université de Dakar, Sénégal.

(2) ORSTOM, centre de Dakar.

(3) Université Paris-Sud, Orsay, France.

(4) Université de Strasbourg, France.

que des précipitations en zone sahélienne et en bordure du littoral atlantique, le grand nombre d'échantillons disponibles livrera des informations sur l'origine et les conditions de distillation des masses de vapeur et sur l'importance relative de la réévaporation en cours de chute.

A titre préliminaire, les premières données des campagnes de 1981 sont présentées et discutées dans cet article.

CADRE DE L'ÉTUDE

Aperçu géographique, hydrologique et climatique

Entre 12°20 et 16°40 de latitude nord, sur la bordure ouest de l'Afrique, le Sénégal couvre une superficie de 210 000 km².

Le pays est extrêmement plat, les altitudes dépassent rarement 40 mètres. En dehors du volcan des Mamelles qui culmine à un peu plus de 100 m aux environs

de Dakar, du massif de N'Diass et de la falaise de Thiès, les seules régions à relief appréciable sont au Sénégal oriental, où quelques lignes de hauteurs atteignent 400 m. Deux grandes unités structurales se partagent le territoire : le socle ancien au sud-est et le bassin sédimentaire qui se prolonge bien au-delà des frontières avec la Mauritanie au nord et la Guinée Bissau au sud.

Deux grands réseaux hydrographiques drainent vers l'ouest les eaux de la partie orientale du pays. Les écoulements du Sénégal (module moyen à Bakel de 1903 à 1985 : 722 m³s⁻¹) et de la Gambie (module moyen à Goulombou de 1953 à 1981 : 292 m³s⁻¹) sont tributaires des précipitations sur le Fouta-Djalou où ces deux rivières prennent leurs sources. Leur régime est de type tropical avec hautes-eaux de juin-juillet à octobre-novembre et basses-eaux aux étiages très prononcés, à la fin du printemps. Une surface importante du territoire sénégalais en rive gauche de la vallée du Sénégal, est aréique.

Les conditions climatiques sont assujetties aux déplacements saisonniers de la zone intertropicale de convergence (ZITC). Il s'agit d'une zone de basses pressions, délimitée par la rencontre des masses d'air

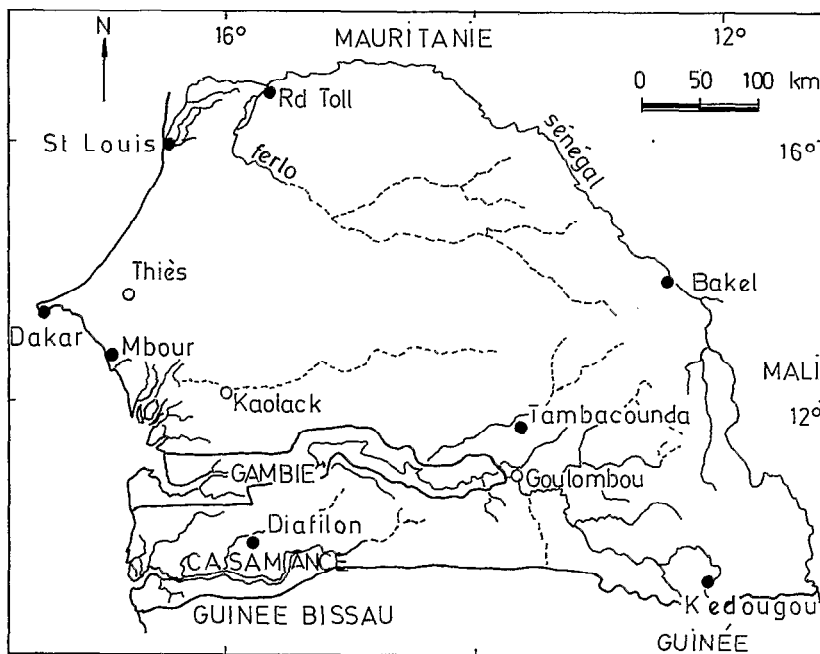


Fig. 1. — Situation géographique des stations (o).
Geographical location of stations.

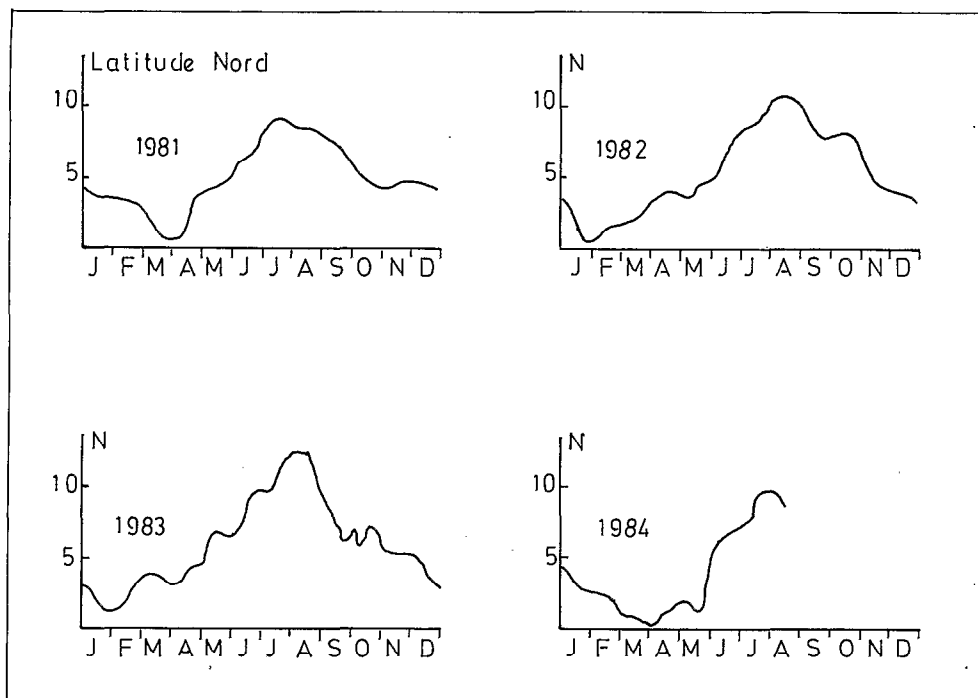


Fig. 2. — Positions mensuelles successives de la ZITC de 1981 à 1984 par 28°W (CITEAU *et al.*, 1984).
*Monthly successive situations of the ZITC from 1981 to 1984 at 28°W (CITEAU *et al.*, 1984).*

en provenance des deux hémisphères (véhiculées par les alizés, l'harmattan et la mousson). La trace au sol de cet « équateur météorologique » est le Front Inter-tropical ou FIT. Les positions mensuelles successives de la ZITC de 1981 à 1984 par 28° W (fig. 2) ont été récemment précisées par CITEAU *et al.* (1984). Au Sénégal, la nature et l'importance des précipitations sont conditionnées par le va-et-vient incessant de ces différentes masses d'air et leurs interpénétrations.

Les fronts et les champs thermiques superficiels océaniques diffèrent selon les saisons et d'une année à l'autre. En saison sèche, de novembre à juin, le courant froid des Canaries et les alizés continentaux poussent au large les eaux de surface. En saison des pluies, de juillet à octobre, les masses d'eaux chaudes tropicales engendrent le contre-courant nord-équatorial qui entraîne les eaux froides vers le nord.

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 bas-

sins 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).

Des entonnoirs à col étroit, surmontant des flacons teintés, ont fait office de pluviomètres. 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 de 1981 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 de 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 Paris-Sud.

LES PRÉCIPITATIONS

Le schéma général

Suivant le schéma classique, l'essentiel des précipitations d'Afrique intertropicale advient en 3 à 4 mois de l'année (hivernage), lors de la migration vers le nord de l'Équateur météorologique. Ce mouvement est dû à l'affaiblissement des zones de hautes pressions atmosphériques de l'hémisphère nord.

Le flux chaud et humide de la mousson repousse progressivement les masses d'air continentales sèches. On peut distinguer trois zones qui progressent simultanément avec du nord au sud :

- une zone sans pluie de 150 à 200 km d'extension ;
- un secteur à pluies orageuses ou « lignes de grains » de 150 à 600 km de profondeur ;
- une zone à pluies continues où l'épaisseur de la mousson est de 4 à 5 000 m.

Au Sénégal, ce schéma classique d'évolution est modifié par l'anticyclone des Açores et l'influence des alizés maritimes. Dans sa partie ouest, le Front Intertropical se dissipe et les pluies continues peuvent progresser alors plus au nord.

Les précipitations débutent en avril au sud-est du pays avec l'arrivée des lignes de grains et s'achèvent en octobre. Les pluies continues remontent généralement chaque année à la hauteur d'une ligne Kédou-

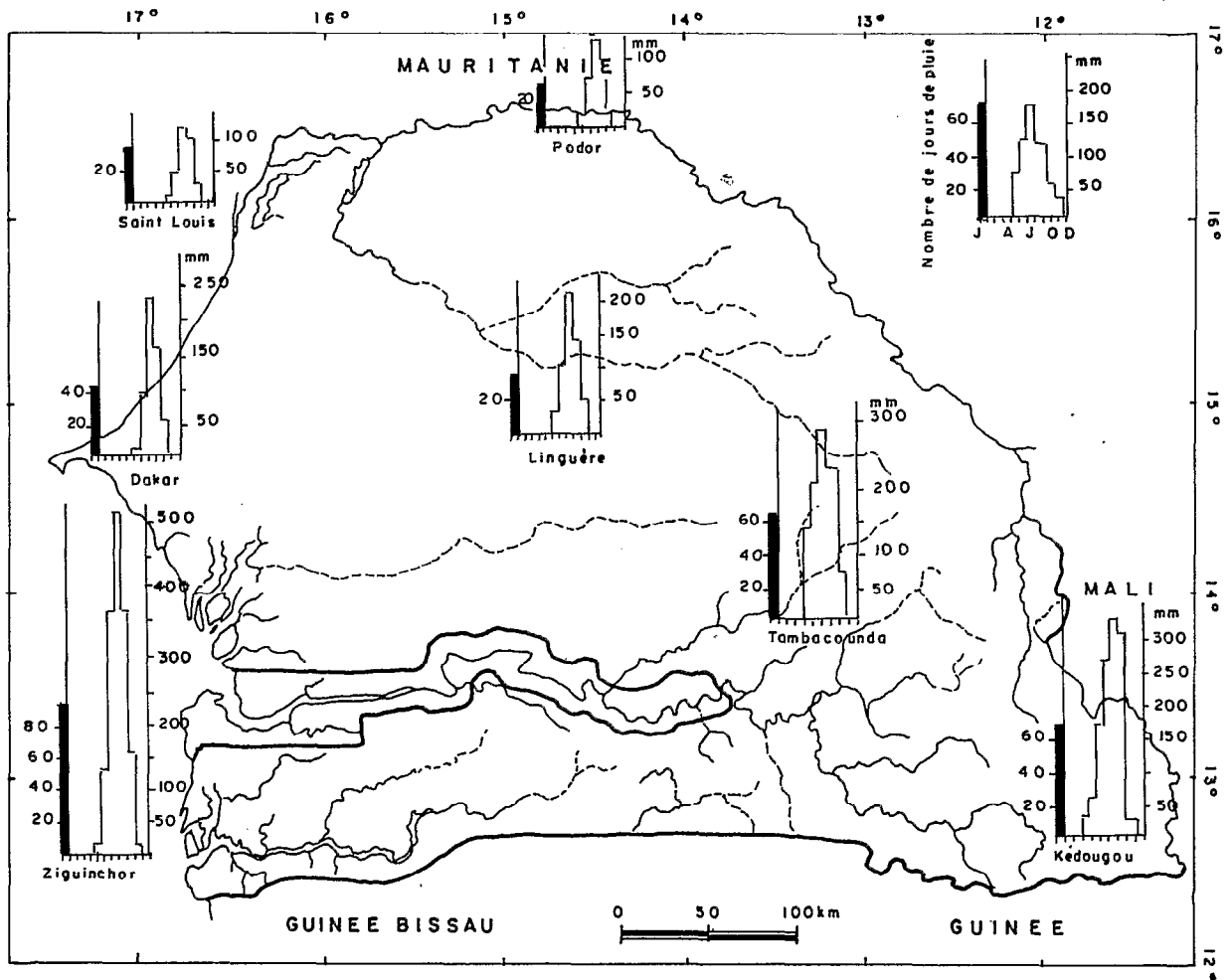


Fig. 3. — Précipitations annuelles aux différentes stations ; nombre de jours de pluie et hauteurs mensuelles.
 Monthly rainfalls at the different stations ; number of days of precipitations and monthly levels.

gou-Kaolack et parfois jusqu'à Dakar. Les lignes de grains qui engendrent les précipitations du nord du pays ont une distribution irrégulière tant dans l'espace que dans le temps et s'affaiblissent d'est en ouest¹.

Sept régions climatiques peuvent être attribuées au Sénégal ; quatre sont déterminées par un gradient géographique de continentalité et trois autres sont liées à la proximité de l'océan. Les précipitations moyennes annuelles de chaque secteur climatique (fig. 3), montrent des variations interannuelles importantes en fonction de la pénétration plus ou moins puissante de la mousson d'origine méridionale vers le nord.

Les caractéristiques pluviométriques de l'année 1981

Dans l'ensemble, les stations de prélèvement couvrent les différentes zones climatiques : Kédougou, Tambacounda, Bakel et Richard-Toll pour l'intérieur du pays ; M'Bour, Dakar et Saint-Louis pour les régions côtières ; Diafilon se trouve à la limite de la zone côtière casamançaise et de la zone intérieure représentée par Kédougou.

Les données pluviométriques de 1981 sur les stations étudiées (tabl. I) montrent un certain déficit en pluies par rapport aux valeurs moyennes. Toutefois, l'année reste relativement humide au sein de la période de sécheresse de ces dernières années. Le déficit relatif ne semble pas lié au gradient nord-sud de hauteur de précipitation établi, entre les stations de Bakel et Tambacounda (août et septembre) et entre Dakar et

Saint-Louis. Cela souligne le caractère aléatoire des précipitations au nord de la zone des pluies continues et l'absence de corrélations simples entre les lames d'eau précipitées par les lignes de grains et la mousson *sensu stricto*.

En 1981, les lignes de grains atteignent Kédougou fin avril. Les pluies continues restent limitées aux stations de Diafilon et Kédougou à l'intérieur du pays et peut-être M'Bour, au mois d'août, sur le littoral.

COMPOSITION CHIMIQUE ET ISOTOPIQUE DES PRÉCIPITATIONS SUR LE SÉNÉGAL

Évolution de la composition chimique des pluies

Les analyses correspondent, dans la plupart des cas, à des valeurs moyennes mensuelles par suite du cumul des échantillons. Les périodes couvertes en 1981 en chaque station sont les suivantes : Bakel du 2/7 au 17/9, Dakar 4/7 au 31/8, Diafilon 20/7 au 31/8, Richard-Toll 4/8 au 17/9, Saint-Louis 24/7 au 17/9 et Tambacounda 10/7 au 12/9. Les tableaux II et III 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
Précipitations (mm) en 1981 et moyennes aux différentes stations
Rainfalls (mm) in 1981 and means at the different stations

| Stations | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | Année 1981 | Moyenne interannuelle | Période |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|---|------------|-----------------------|-----------|
| St-Louis | 6.8 | 0 | 0.7 | 0.0 | 0.0 | 15.3 | 49.2 | 168.7 | 94.0 | 1.1 | 0 | 0 | 335.8 | 356 | 1902-1982 |
| Rd.Toll | 4.5 | 0 | 0.8 | 0.0 | 0.7 | 2.8 | 103.7 | 99.6 | 84.4 | 3.0 | 0 | 0 | 306.7 | 235 | 1962-1982 |
| Dakar | 0.0 | 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 22 | 55.2 | 138.3 | 49.7 | 8.4 | 0 | 0 | 273.6 | 475 | 1947-1985 |
| Mbour | 0.0 | 0 | 0.0 | 0.0 | 0.3 | 23.5 | 89.7 | 235.5 | 109.0 | 8.0 | 0 | 0 | 466.0 | 662 | 1951-1981 |
| Bakel | 0.0 | 0 | 8.5 | 0.0 | 2.0 | 3.3 | 162.0 | 304.8 | 58.0 | 0.7 | 0 | 0 | 531.3 | 638 | 1922-1982 |
| Tambacounda | 0.0 | 0 | 0.0 | 0.0 | 42.5 | 31.0 | 184.2 | 243.9 | 38.7 | 28.0 | 0 | 0 | 568.3 | 854 | 1951-1980 |
| Diafilon | | | | | 21.0 | 67.8 | 318.0 | 285.8 | 168.5 | 172.0 | 0 | 0 | 1034.0 | - | - |
| Kédougou | 0.0 | 0.5 | 2.8 | 7.0 | 121.2 | 116.4 | 291.6 | 386.6 | 294.0 | 85.9 | 0 | 0 | 1305.5 | 1289 | 1951-1981 |

(1) Une mini-saison des pluies peut avoir lieu de novembre à février. Baptisée « pluies des mangues », ces précipitations sont plus connues sous le nom de « Heug ». Elles constitueraient selon PEREIRA-BARRETO (1979) un contre-coup hivernal des perturbations atmosphériques européennes.

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, 1957, 1961 - CHESSELET *et al.*, 1972 - MATHIEU, 1976).

La minéralisation globale : elle est représentée ici par la conductivité et la somme anions-cations (fig. 4) comprises entre 8,6 et 130 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ et 0,13 et 0,92 $\text{m}\ddot{\text{e}}\text{q}\cdot\text{l}^{-1}$ respectivement. Elle décroît de l'océan vers l'intérieur des terres et, d'une manière un peu

moins nette, du nord 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.

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

Tableau II
Composition chimique mensuelle des pluies (mg/l) aux différentes stations en 1981
Monthly chemical composition of the rains (mg/l) in the different stations

| Stations continentales Mois | Tambacounba | | | Kédougou | | Diafilon | | | Bakel | | |
|--|----------------|-------|------|----------------|-------|----------------|------|----------------|-------|-------|--|
| | J ^t | A | S | J ^t | A | J ^t | A | J ^t | A | S | |
| pH | 6.3 | 6.4 | 5.96 | 6.4 | 6.29 | 5.96 | 6.14 | 6.68 | 6.89 | 5.98 | |
| Cond (μS) | 10.9 | 22.5 | 9.20 | 23.6 | 20.50 | 8.60 | 9.90 | 20.2 | 22.3 | 40.8 | |
| NH ₄ ⁺ | 0.04 | 0.04 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.09 | |
| Na ⁺ | 0.55 | 0.90 | 0.53 | 0.87 | 0.41 | 0.55 | 0.48 | 0.76 | 0.53 | 2.83 | |
| K ⁺ | 0.16 | 0.31 | 0.27 | 0.59 | 0.39 | 0.23 | 0.66 | 0.35 | 0.27 | 0.86 | |
| Mg ²⁺ | 0.15 | 0.63 | 0.07 | 0.19 | 0.15 | 0.10 | 0.15 | 0.15 | 0.17 | 0.49 | |
| Ca ²⁺ | 1.04 | 2.16 | 0.56 | 2.92 | 2.68 | 0.60 | 0.40 | 2.44 | 3.04 | 2.96 | |
| HCO ₃ ⁻ | 3.54 | 11.47 | 0.43 | 9.33 | 7.75 | 1.83 | 2.26 | 7.20 | 8.54 | 9.45 | |
| Cl ⁻ | 0.74 | 0.67 | 0.96 | 1.85 | 1.35 | 0.75 | 0.82 | 1.38 | 1.49 | 5.33 | |
| NO ₂ ⁻ | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | |
| NO ₃ ⁻ | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.37 | 0.70 | |
| SO ₄ ²⁻ | 0.77 | 0.49 | 1.15 | 0.39 | 0.78 | 0.67 | 0.67 | 1.06 | 0.58 | 1.82 | |
| H ₄ SiO ₄ | 0.77 | 2.21 | 0.19 | 0.77 | 0.48 | 0.77 | 0.57 | 0.67 | 0.67 | 1.02 | |
| SO ₄ ²⁻ /Cl ⁻ | 1.04 | 0.73 | 1.20 | 0.21 | 0.58 | 0.89 | 0.82 | 0.77 | 0.39 | 0.34 | |
| Total | 7.88 | 19.00 | 4.30 | 17.05 | 14.13 | 5.64 | 6.15 | 14.15 | 15.73 | 24.97 | |

| Stations côtières Mois | Mbour | | Dakar | | St. Louis | | Rd. Toll | | |
|--|----------------|-------|------------------------|------|------------------------|------------------------|----------------|-------|-------|
| | J ^t | A | J ^t | A | J ^t | A | J ^t | A | S |
| pH | 6.72 | 6.25 | 3.56 | n.d. | 5.26 | 3.75 | 5.54 | 6.87 | 6.85 |
| Cond (μS) | 54.20 | 20.50 | 130.00 | n.d. | 29.00 | 74.20 | 20.50 | 67.60 | 53.20 |
| NH ₄ ⁺ | 0.05 | 0.02 | 0.05 | 0.29 | 0.02 | 0.40 | 0.02 | 1.17 | 0.43 |
| Na ⁺ | 5.15 | 2.19 | 3.91 | 3.13 | 1.59 | 0.90 | 1.10 | 6.44 | 5.57 |
| K ⁺ | 0.70 | 0.31 | 1.02 | 0.39 | 0.35 | 0.90 | 0.43 | 0.86 | 0.63 |
| Mg ²⁺ | 0.63 | 0.27 | 0.56 | 0.32 | 0.29 | 0.22 | 0.24 | 0.85 | 0.27 |
| Ca ²⁺ | 3.20 | 0.80 | 3.12 | 1.12 | 1.68 | 1.44 | 1.28 | 2.52 | 2.64 |
| HCO ₃ ⁻ | 7.81 | 2.93 | 4.58(+H ⁺) | - | 0.61(+H ⁺) | 3.54(+H ⁺) | 0.67 | 11.71 | 12.57 |
| Cl ⁻ | 8.40 | 3.20 | 17.29 | - | 4.12 | 1.78 | 2.13 | 8.09 | 4.47 |
| NO ₂ ⁻ | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 |
| NO ₃ ⁻ | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 3.35 | 13.02 | 2.79 | 0.62 | 0.62 |
| SO ₄ ²⁻ | 4.51 | 1.63 | 5.09 | 5.09 | 1.25 | 2.40 | 1.15 | 7.39 | 2.21 |
| H ₄ SiO ₄ | 0.67 | 0.19 | 1.25 | 0.67 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.86 | 0.67 |
| SO ₄ ²⁻ /Cl ⁻ | 0.54 | 0.51 | 0.29 | - | 0.30 | 1.35 | 0.54 | 0.91 | 0.49 |
| Total | 31.24 | 11.66 | 36.99 | - | 13.79 | 25.13 | 10.34 | 40.86 | 30.13 |

Tableau III

Composition chimique moyenne pondérée pour l'année 1981 aux stations continentales et côtières (mg/l)
Medium chemical composition balanced for the year 1981 at the continental and coastal stations (mg/l)

| Stations | Continentales | | | | | Côtières | | |
|---------------------------------|---------------|-------|-------|----------|-------|----------|----------|---------|
| | Kédougou | Bakel | Tamba | Diafilon | Mbour | Dakar | St.Louis | Rd.Toll |
| NH ₄ ⁺ | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 0.03 | 0.22 | 0.23 | 0.03 |
| Na ⁺ | 0.57 | 0.85 | 0.73 | 0.51 | 3.01 | 3.36 | 1.07 | 6.04 |
| K ⁺ | 0.46 | 0.36 | 0.24 | 0.47 | 0.42 | 0.57 | 0.67 | 0.75 |
| Ca ²⁺ | 2.76 | 2.85 | 1.58 | 0.48 | 1.46 | 1.70 | 1.43 | 2.50 |
| Mg ²⁺ | 0.18 | 0.20 | 0.39 | 0.13 | 0.37 | 0.39 | 0.24 | 0.50 |
| HCO ₃ ⁻ | 8.29 | 8.22 | 7.43 | 2.07 | 4.28 | - | 2.21 | 12.11 |
| Cl ⁻ | 1.52 | 1.88 | 0.72 | 0.79 | 4.64 | - | 2.26 | 6.42 |
| NO ₃ ⁻ | 0.07 | 0.24 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 8.40 | 0.07 |
| SO ₄ ²⁻ | 0.64 | 0.87 | 0.66 | 0.67 | 2.42 | 5.09 | 1.84 | 5.01 |
| H ₄ 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 |

Les ions sodium et chlorures : les concentrations en sodium varient de 0,41 à 6,44 mg·l⁻¹. Cet élément représente le cation dominant à Richard-Toll, Dakar, Saint-Louis, M'Mour et Diafilon, donc au voisinage de la côte ; il s'associe le plus souvent aux minéralisations 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 Cl⁻ varient de 0,5 à 8,4 mg·l⁻¹, parallèlement à celles de Na⁺ 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 Ca²⁺ sont assez homogènes sur l'ensemble du territoire. Les variations les plus fortes se manifestent le plus souvent d'un mois à l'autre à une même station. Les teneurs varient de 0,4 à 3,2 mg·l⁻¹ et Ca²⁺ 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 recueillies à Dakar (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⁻¹. Les rapports Mg²⁺/Na⁺ sont très voisins de celui de l'eau de mer pour les stations côtières (Dakar et M'Bour) ; 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 aux stations côtières. Toutefois, dès qu'on s'éloigne du littoral, la distribution de SO₄²⁻ météorique devient erratique. Le rapport pondéral SO₄²⁻/Cl⁻ est ici toujours nettement supérieur à celui de l'eau de mer (0,14), aussi bien pour les stations continentales que pour les stations côtières. Cela correspond au phénomène d'enrichissement en ion sulfate par rapport au chlorure 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⁻¹) et la répartition ne semble obéir à aucun déterminisme géographique ou saisonnier.

Les ions nitrate et ammonium : les concentrations en nitrates et ammonium sont presque partout très faibles et inférieures aux limites de détection (0,07 mg·l⁻¹ pour NO₃⁻ et 0,02 mg·l⁻¹ pour NH₄⁺). Des valeurs plus élevées ont été décelées à Saint-Louis et

surtout Richard-Toll où il semble possible de relier cet excès local aux activités de l'usine de la « Compagnie Sucrière du Sénégal », implantée dans cette région.

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. On peut cependant remarquer que les pluies les plus acides ($\text{pH} < 5,26$) se rencontrent à Dakar et Saint-Louis où existent des activités industrielles. Sur Dakar, elles sont associées à des teneurs plus fortes en sulfates et sur Saint-Louis, à des teneurs plus élevées en nitrates que dans le reste du pays.

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

— Si de manière classique Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} et SO_4^{2-}

présentent leurs teneurs maximum sur les régions côtières, le rapport Cl^-/Na^+ ne subit pas de diminution nette lorsqu'on s'éloigne de la côte et s'inscrit à des valeurs souvent différentes de celles de l'eau de mer.

— Les teneurs relatives en ions Ca^{2+} n'augmentent pas de manière significative, mais les teneurs relatives $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ sont plus fortes vers l'intérieur des terres.

— Les rapports $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ et $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ ne présentent pas de gradient régulier.

On observe des différences très importantes d'un mois à l'autre sur une même station, excepté dans la zone des pluies continues (Kédougou et Diafilon).

L'absence de dépendance nette apparaît également dans la faiblesse des coefficients de corrélation entre les différents éléments (tabl. IV).

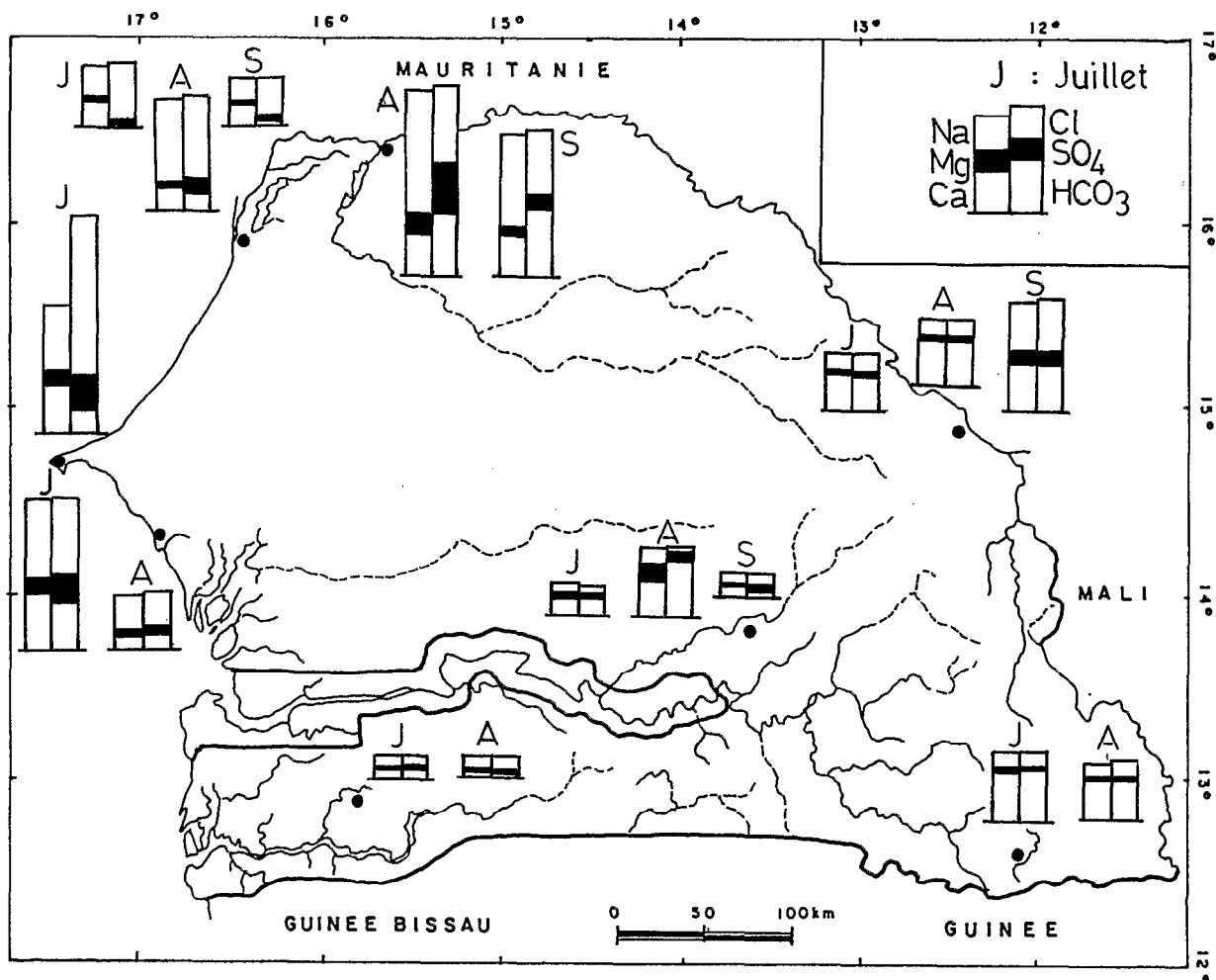


Fig. 4. — Distribution mensuelle des teneurs ioniques de précipitations.
Monthly distribution of ionic contents of the rainfalls.

Tableau IV

Coefficients de corrélation entre les concentrations ioniques mensuelles sur l'ensemble des stations
Corelative coefficient between the monthly ionic concentration on the whole stations

| | Cond. | Na ⁺ | K ⁺ | Mg ²⁺ | Ca ²⁺ | Cl ⁻ |
|-------------------------------|-------|-----------------|----------------|------------------|------------------|-----------------|
| SO ₄ ²⁻ | 0.21 | 0.25 | 0.07 | 0.12 | 0.12 | 0.63 |
| Cl ⁻ | 0.28 | 0.56 | 0.07 | 0.28 | 0.21 | |
| Ca ²⁺ | 0.60 | 0.20 | 0.21 | 0.10 | | |
| Mg ²⁺ | 0.46 | 0.46 | 0.23 | | | |
| K ⁺ | 0.34 | 0.07 | | | | |
| Na ⁺ | 0.34 | | | | | |

Tableau V

Teneurs ioniques moyennes de fleuves Sénégal et Gambie
Middel ionic degree of streams Senegal and Gambie

| | Sénégal | Gambie |
|-------------------------------|------------|--------|
| HCO ₃ ⁻ | 24.36 mg/l | 24.30 |
| SO ₄ ²⁻ | 0.15 | 0.10 |
| Cl ⁻ | 1.32 | 0.90 |
| Na ⁺ | 1.92 | 2.20 |
| SiO ₂ | 7.64 | 12.60 |
| K ⁺ | 1.81 | 1.40 |
| Ca ²⁺ | 3.39 | 7.90 |
| Mg ²⁺ | 1.75 | 3.20 |
| Total | 42.34 | 52.50 |

Cela est peut-être dû à la nature même du régime climatique intertropical qui délimite des zones fluctuantes, à précipitations d'origine différente. A cette cause de variabilité se superpose celle de l'influence océanique sur la frange ouest du pays. D'une manière

générale, les valeurs moyennes pondérées enregistrées au Sénégal ne présentent pas de caractère exceptionnel. Les eaux recueillies sur nos stations continentales sont un peu plus minéralisées que celles collectées au nord de la Côte-d'Ivoire (MATHIEU, 1976) sous des conditions climatiques et à une latitude sensiblement identiques. Par ailleurs, sulfate et nitrate sont, comme attendu, nettement moins abondants au Sénégal, en particulier sur les stations continentales, que sur les continents américain et européen (BOURRIÉ, 1978 ; WHITEHEAD et FETH, 1964 ; SASSEVILLE et LACHANCE, 1981).

Il est remarquable que le bilan des ions hygrophiles (Cl⁻, Na⁺) indique un très net déficit dans les rivières par rapport aux pluies (tabl. V).

Composition isotopique des pluies

Oxygène 18 et deutérium ont été dosés sur les échantillons de juillet et août, aux stations de M'Bour, Diafilon, Tambacounda et Richard-Toll (tabl. VI).

Collectés dès la fin des averses pour éviter tout risque d'évaporation, les eaux d'un mois donné ont été regroupées dans un même récipient. L'analyse a donc porté sur une partie aliquote de la précipitation mensuelle (échantillon mensuel moyen pondéré).

Tableau VI
 Composition isotopique des pluies
Isotopic composition of rains

| Stations | Mbour | | Diafilon | | Tambacounda | | Richard - Toll | |
|--------------------|---------|------|----------|-------|-------------|-------|----------------|-------|
| | Juillet | Août | Juillet | Août | Juillet | Août | Juillet | Août |
| δ ¹⁸ O‰ | -4.05 | - | -8.08 | -6.66 | -6.33 | -6.60 | -5.83 | -5.38 |
| δ ² H‰ | 22.7 | - | -54.3 | -42.6 | -42.4 | -41.9 | -32.9 | -33.1 |

La relation linéaire entre les teneurs en deutérium et en oxygène 18 (fig. 5) : $\delta^2\text{H} = 7,93\delta^{18}\text{O} + 10,09$ avec un coefficient de corrélation ($r=0,972$) est assez voisine de celle dite de la « droite des eaux météoriques » définie à l'échelle océanique mondiale : $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ (CRAIG, 1961) et confirmée par les études très documentées de YURTSEVER et GAT (1981) $\delta^2\text{H} = (8,17 \pm 0,08)^{18}\text{O} + (10,56 \pm 0,64)$ sur les moyennes pondérées de l'ensemble du réseau OMM.AIEA (Organisation Météorologique Mondiale - Agence Internationale de l'Énergie Atomique).

Les conséquences en sont diverses.

— Au cœur de la saison des pluies, les précipitations n'ont pas subi, en cours de chute, d'évaporation dont l'effet aurait été de déplacer les points sous la droite des eaux météoriques. Un tel effet d'évaporation avait été reconnu en différentes stations de zones tropicales sèches ou même humides (GAT et DANSGAARD, 1972 ; YURTSEVER et GAT, 1981). La colonne d'air traversée par la pluie de mousson est donc saturée en eau. A l'échelle du mois, les variations de salinité des eaux pluviales sont donc uniquement dues à des effets de source.

— La vapeur qui condense sur l'ensemble du territoire sénégalais en juillet et août a une même origine océanique sans mélange significatif avec d'autres sources possibles et en particulier avec de la vapeur évapotranspirée par la forêt située plus au sud.

Bien que le nombre de mesures soit limité, les teneurs en ^{18}O semblent varier avec les températures moyennes au sol, les hauteurs précipitées et la proximité de l'océan. La station de M'Bour, sur le rivage atlantique, montre les précipitations les plus riches en isotopes lourds. Cela correspond aux premiers stades de condensation de la vapeur d'origine océanique.

Aucun « effet de continentalité » ne peut être associé à l'avancement de la mousson en provenance du Golfe de Guinée sur le Sénégal. Les teneurs les plus faibles se rencontrent au sud dans la zone des

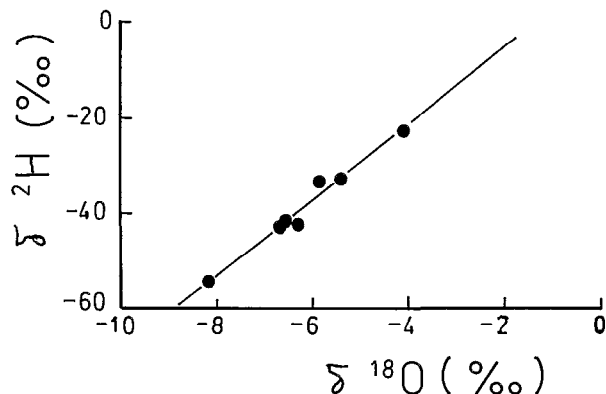


Fig. 5. — Relation entre teneurs en oxygène 18 et en deutérium des précipitations au Sénégal.

Relation between the contents in oxygen 18 and deuterium of rainfalls in Senegal.

« pluies continues ». Vers le nord, les teneurs en isotopes lourds des précipitations croissent avec les températures et surtout avec la diminution de la pluviosité. La tendance à l'augmentation simultanée des teneurs en isotopes lourds et en chlorures (tabl. II et III) sur les stations continentales n'est pas due à l'évaporation. Elle est difficile à expliquer par un mécanisme de distillation fractionnée. En ce cas, les « queues » de distillation devraient être appauvries en isotopes lourds et en chlorures. On est conduit à découpler l'apport de vapeur et l'apport en aérosols marins. Le premier viendrait du sud avec la mousson, l'autre serait poussé vers le continent par le contre-alizé des Açores et se trouverait ensuite plus ou moins dilué par le volume d'eau précipité.

Par ailleurs, les résultats obtenus sont assez différents des teneurs moyennes en ^{18}O et ^2H à Bamako, station sahélienne du réseau OMM-AIEA (AIEA, 69-78) qui sont de l'ordre de -2 et -13 ‰ respectivement. Il semblerait que les précipitations sur l'intérieur de la zone sahélienne soient en ce cas largement modifiées par l'évaporation.

CONCLUSIONS

Ce travail de reconnaissance conduit à considérer deux sources et deux itinéraires différents pour la vapeur génératrice des pluies de mousson et des aérosols porteurs de sels marins.

La vapeur en provenance du sud n'apporterait que très peu de sels et 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 au Sénégal est due à un apport direct d'embruns et d'aérosols océaniques apportés du large par le contre-alizé marin.

Les eaux fluviatiles en provenance des hauts bassins du Sénégal et de la Gambie sont moins riches en sels (tabl. II) que les précipitations sèches et humides au Sénégal en saison des pluies. Toute estimation d'évapotranspiration fondée sur le bilan des chlorures entre les pluies et l'écoulement est donc vaine sur l'ensemble des bassins et ne pourrait être tentée qu'à l'échelle des sous-bassins.

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

— Au cours de la période de sécheresse, les nappes phréatiques ne contribuent pratiquement pas à l'écoulement, et une augmentation de la salinité du réseau de surface serait donc à attendre en année pluvieuse sous les effets cumulés du « rinçage » des sols et de l'apport d'une précipitation elle-même plus salée.

— La régulation saline des nappes s'effectue nécessairement par écoulement souterrain vers des systèmes endoréiques avec accumulations localisées de sels, ce qui confirme une notion hydrogéologique bien établie au Sénégal.

BIBLIOGRAPHIE

- IAEA, 1981. — Stable isotopic hydrology. Deuterium and oxygen in the water cycle. Technical Reports Series, n° 10, 339 p.
- BOURRIE (G.), 1978. — Acquisition de la composition chimique des eaux en climat tempéré. Application aux granites des Vosges et de la Margeride. Thèse Doc. ing. Strasbourg et *Mém. Sciences Géol.*, n° 52, 207 p.
- CHESELET (R.), MORELLI (J.) et BUAT-MENARD (P.), 1972. — Variation in ionic ratios between reference sea water and marine aerosols. *Journ. Geophys. Res.*, 77, 27 : 5116-5131.
- CITEAU (J.), CAMAS (J.P.) et GOURIOU (Y.), 1984. — Position de la zone intertropicale de convergence à 28° Ouest et température de surface dans le Golfe de Guinée. *Bull. Veille Climatique Satellitaire* (Ed. ORSTOM, Centre Météor. Spatiale, Lannion), n° 3 : 3-7.
- GAC (J.Y.), 1985. — Le phénomène des brumes sèches au Sénégal en 1984 et 1985. *Bull. Veille Climatique Satellitaire*, 7, 31-35.
- CRAIG (H.), 1961. — Isotopic variation in meteoric waters. *Science*, 133, p. 1702.
- GAT (J.R.), and DANSGAARD (W.), 1972. — Stable isotope survey of the fresh water occurrences in Israël and the Northern Jordan Rift. *Journ. of Hydrol.*, 16, p. 177.
- 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.
- IAEA, 1969-70-71-73-75-78. — Environmental Isotope Data. World Survey of Isotope Concentration in Precipitation. 1 to 6. Technical Reports Series, n° 96 : 421 p. ; n° 117 : 402 p. ; n° 129 : 402 p. ; n° 147 : 334 p. ; n° 165 : 309 p. ; n° 192 : 187 p.
- JUNGE (C.E.) and GUSTAFSON (P.E.), 1957. — On the distribution of sea salt over the United States and its removal by precipitation. *Tellus*, IX, 2 : 104-173.
- JUNGE (C.E.) and 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 techn. Inst. Géol. Strasbourg*, n° 11, 59 p.
- LEROUX (M.), 1980. — Climat du Sénégal. In : Atlas du Sénégal, Éd. Jeune Afrique.
- MATHIEU (P.) and MONNET (C.), 1971. — Physico-chimie des eaux de pluie en savane et sous forêt en milieu tropical. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, III, n° 2 : 9-30.
- 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.*, VIII, n° 1 : 11-31.
- SASSEVILLE (J.L.) et LACHANCE (M.), 1981. — Description de la qualité des eaux atmosphériques. Eau, Québec, 14 : 27-34.
- WHITEHEAD (H.C.), and FETH (J.H.), 1964. — Chemical composition of rain, dry fallout and bulk precipitation at Menlo Park California, 1967-1969. *Journ. Geophys. Res.*, 69, 16 : 3319-3333.
- YURTSEVER (Y.) and GAT (J.R.), 1981. — Deuterium and oxygen 18 in precipitation. In : « Deuterium and Oxygen 18 in the Water Cycle » Technical Reports Series, IAEA, Vienne, n° 210.