

Pole 1
70601

LE FLEUVE SÉNÉGAL : II. FLUX CONTINENTAUX DE MATIÈRES DISSOUTES A L'EMBOUCHURE

Jean Yves GAC* et Alioune KANE**

RÉSUMÉ — Les événements géochimiques majeurs à l'embouchure du Sénégal sont liés aux phénomènes de la remontée cyclique des eaux marines dans la vallée du fleuve. La première partie de cette étude précise les variations saisonnières de la salinité et l'évolution de la composition chimique des eaux dans le milieu estuarien. Les flux dissous d'origine continentale mesurés de 1981 à 1983 s'élèvent en moyenne à 420 000 tonnes/an ; ils correspondent à une charge en solution de 42 mg/l et à un taux d'érosion chimique de l'ordre de 1,85 t/km²/an. A partir du bilan de l'érosion mécanique et de l'altération chimique, de nouvelles propositions sont formulées pour appréhender l'acquisition des charges particulières et dissoutes par les fleuves sahéliens et préciser dans les hydrogrammes annuels les contributions respectives des eaux de ruissellement et des eaux souterraines.

Fleuve Sénégal, Afrique, Altération chimique, Transports dissous

Senegal river. Part II. Discharge of dissolved matter through the mouth

ABSTRACT — In the estuary of the river Senegal, the major geochemical events are related to the annual incursion of marine waters up stream in the valley of the river. The first part of this study is devoted to the description of the seasonal variations of the salinity and to the evolution of the chemical composition of solutions in the estuarine environment. The mean annual discharge of dissolved matter of continental origin for the 1981-1983 period is equal to 420,000 ton/year, this corresponds to 42 mg/l of TDS and to a chemical erosion rate of 1.85 t/km²/year. By combining the balances of mechanical erosion and chemical alteration, new proposals are presented for understanding how sahelian rivers get their load of suspended particles and dissolved elements, and for precisising the respective contributions of running waters and discharge waters to the yearly hydrograms.

Senegal river, Africa, Chemical weathering, Dissolved matter

I — EVOLUTION GÉNÉRALE DE LA PHYSICO-CHIMIE DES EAUX DU SÉNÉGAL A SON EMBOUCHURE

1. Evolution de la conductivité et de la salinité

a) *Variation saisonnière de la conductivité*

La conductivité ou « conductance spécifique » permet le contrôle simple et rapide de la minéralisation des solutions. D'une manière générale, et pour un type d'eau donné, la conductivité augmente lorsque les eaux se concentrent. Elle est exprimée en Siemens par centimètre (S/cm).

A St Louis (fig. 1), les mesures de la conductivité ont été effectuées à chaque prise d'échantillon pour analyse ; des contrôles complémentaires à l'aide du conductivimètre portatif Tacussel (CD 9 PN) permettent d'avoir une idée assez précise de l'évolution de la charge soluble, de juin 1981 à août 1983 (période qui couvre les deux cycles étudiés).

* ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération), Centre de Hann, BP 1386, Dakar, Sénégal.

** Laboratoire de Géographie physique de l'Université de Nancy II, 23 boulevard Albert 1er, BP 33-97, Nancy Cedex, France.

ORSTOM Fonds Documentaire

M N° : 23693 ex.1 21

Cote : B Date : 870601

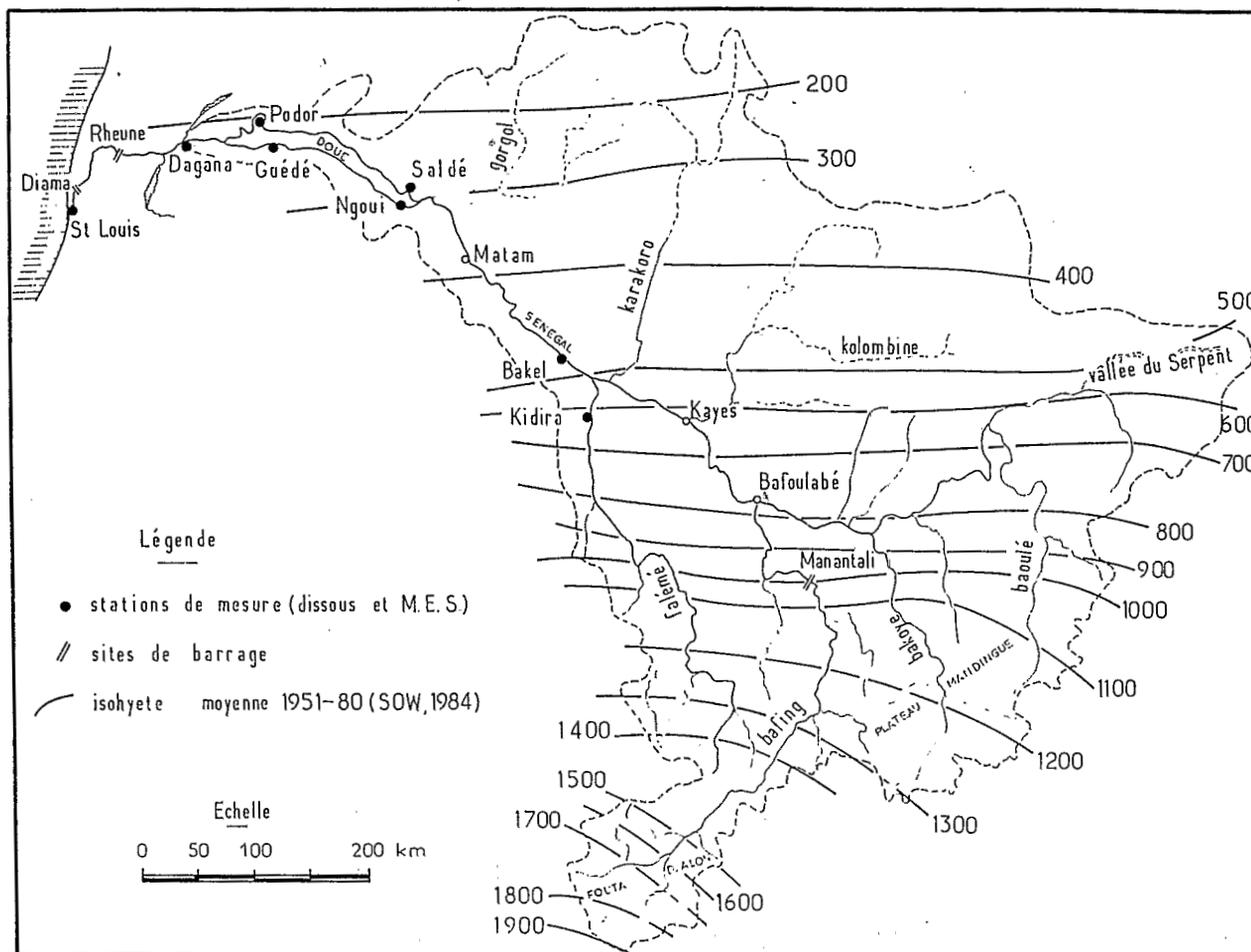


Fig. 1 — Situation géographique du bassin versant du Sénégal.
 Map of Senegal river showing locations where sediments were measured since 1980.

La distinction entre eau douce et eau salée à l'embouchure du Sénégal apparaît très nettement sur la figure 2. L'enseignement le plus important est l'extrême réduction dans le temps de la présence d'eau douce et évidemment, en corollaire, le maintien d'eau salée pendant près de 10 mois sur 12. Le « lissage » des courbes donnerait la répartition suivante (marge d'erreur ± 3 jours) :

1981/1982 : eau douce du 7 août 1981 au 25 octobre 1981, eau salée du 26 octobre 1981 au 24 août 1982,
 1982/1983 : eau douce du 25 août au 28 octobre 1982, eau salée du 29 octobre 1982 au 20 août 1983,

soit un temps d'eau douce à St Louis de 80 jours en 1981, de 65 jours en 1982 et de 59 jours en 1983 (du 21 août au 19 octobre). La comparaison avec les durées moyennes (eau douce : 117 jours, eau salée : 248 jours), établies depuis 1903 par GAC *et al.* (1983 ; 1985), souligne l'extrême sévérité des étiages actuels du Sénégal.

L'arrivée de la crue annuelle détermine une décroissance très rapide de la conductivité qui, en moins de 3 semaines à 1 mois, passe de 50 mS/cm à 100 μ S/cm. Après le passage de la crue, la conductivité augmente à nouveau : la croissance est plus lente et procède par à-coups sous l'effet du flux et du reflux des eaux marines dans la vallée.

L'évolution de la conductivité pendant la saison des hautes-eaux (fig. 2) montre qu'elle oscille entre 100 et 200 μ S/cm, valeurs qui paraissent élevées par rapport à celles observées à l'amont du fleuve (en général, de l'ordre de 60 μ S/cm). Ceci semble indiquer que même durant l'installation des eaux dites « douces à St Louis », des incursions marines mineures peuvent se produire. Nous verrons plus loin qu'elles gênent considérablement l'évaluation de l'héritage dissous continental.

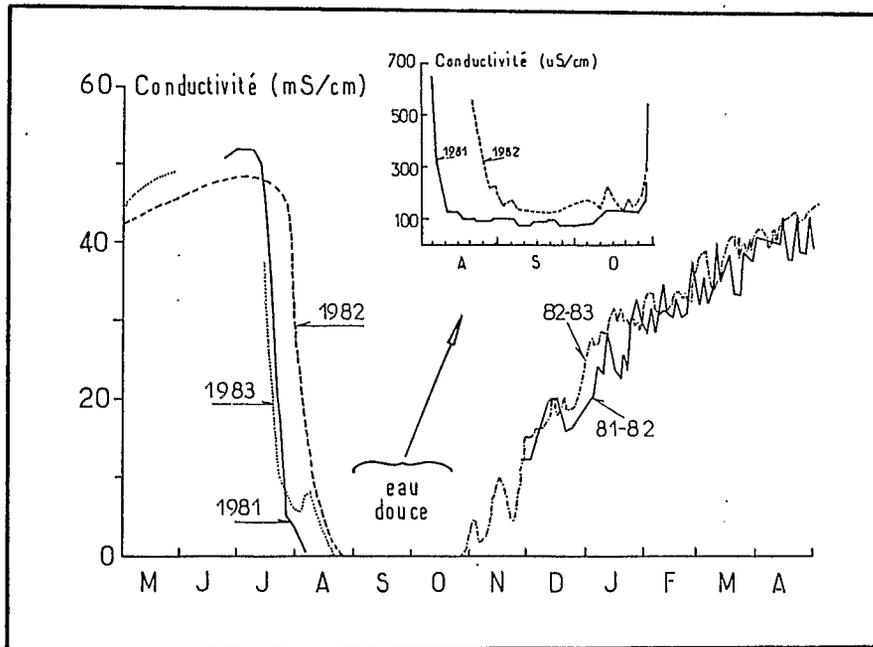


Fig. 2 — Evolution saisonnière de la conductivité à St Louis de juin 1981 à août 1983.
Seasonal evolution of the electrical conductivity at St Louis, from June 1981 to August 1983.

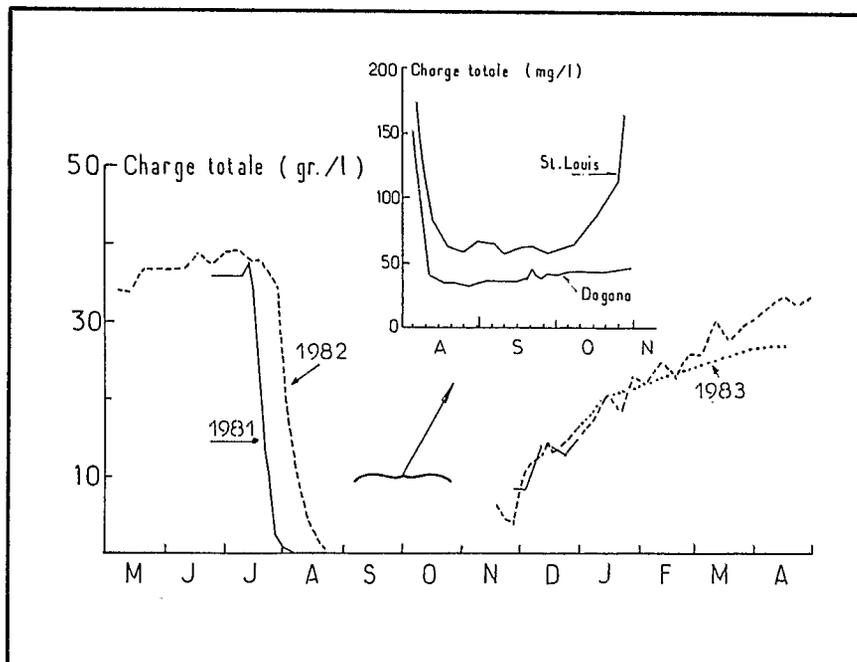


Fig. 3 — Evolution saisonnière de la charge totale dissoute à St Louis de juin 1981 à août 1983.
Seasonal evolution of the total dissolved matter at St Louis from June 1981 to August 1983.

b) Variation saisonnière de la salinité

La charge totale en solution évolue parallèlement à la conductivité (fig. 3). Pendant la période des hautes-eaux, la charge en solution dans les eaux du Sénégal à St Louis se stabilise autour de 60-70 mg/l. Elle est

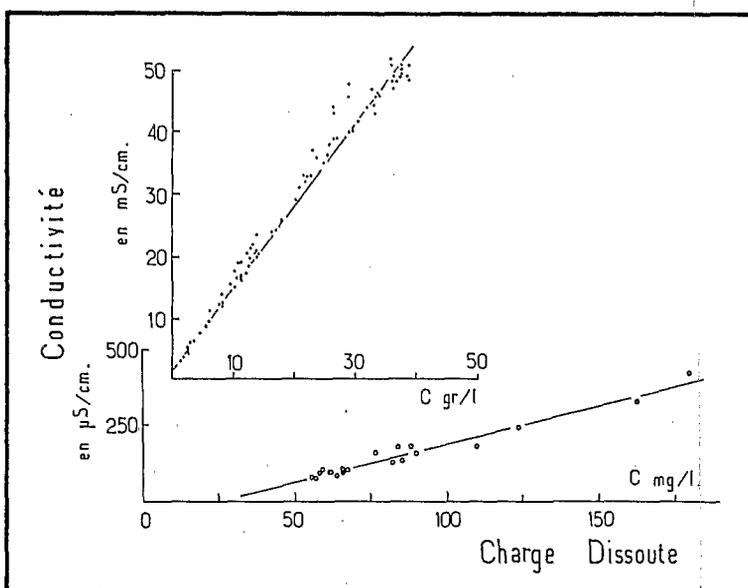
bien plus élevée qu'à la station amont de Dagana où les valeurs oscillent entre 35 et 40 mg/l. Au niveau des éléments dissous, on constate qu'à l'exception du chlore et du sodium, tous les autres constituants ont des teneurs comparables : ces deux éléments qui se singularisent étant aussi les ions dominants dans l'eau de mer, celle-ci est donc manifestement présente à la hauteur de St Louis, même en période de crue.

Dès la mi-octobre, la charge ionique des eaux augmente régulièrement au rythme de la pénétration de la mer dans la vallée du fleuve. A St Louis, la salinité au cours du cycle 1981/1982 a dépassé 10 ‰ à la mi-mars et atteint celle de l'eau de mer, 35 ‰, à partir du 15 mai : la salinité maximum a été notée le 07/07/1982, avec une charge en solution de 39 g par litre d'eau. En 1982/1983, les dates de franchissement de ces différents taux de salinité sont sensiblement identiques (10 ‰ le 1er décembre, 20 ‰ le 15 janvier et 30 ‰ le 15 mai). Au cours de ce dernier cycle, les investigations analytiques n'ont pas été poussées au-delà du 15 mai 1983, mais le suivi des mesures de conductivité jusqu'à l'arrivée tardive (20 août 1983) de l'onde de crue 1983/1984 permet d'affirmer avec certitude que la salinité a très nettement dépassé le seuil de 35 ‰ dès la fin du mois de mai. Ce résultat a été récemment confirmé par SAOS *et al.* (1984) qui ont mis en évidence la présence, en juin et juillet 1983, de taux de salinité supérieurs à 35 ‰ jusqu'à 80 km de l'embouchure ; ces auteurs font état du fonctionnement « inverse » de l'estuaire du Sénégal, des charges en solution de 40 g/l ayant été mesurées à plus de 50 km de l'embouchure. Il faut souligner que des phénomènes semblables sont fréquents dans les autres estuaires de la Sénégalie (Sine-Saloum, Gambie et Casamance) mais qu'ils demeurent tout à fait exceptionnels et de brève durée au niveau du Sénégal.

c) Relation conductivité/salinité

La relation entre la conductivité (C.E.) et la salinité a été établie en distinguant la période courte des hautes-eaux et celle plus longue où se fait sentir l'influence marine. Ceci revient globalement à dissocier les eaux à partir d'un seuil de conductivité de 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Dans les deux cas, les droites de régression et les coefficients de corrélation linéaire ont été calculés à partir de l'ensemble des prélèvements effectués à St Louis (de 1979 à 1983). Pour les eaux fortement minéralisées, on remarque (fig. 4) une légère dispersion des points représentatifs au-delà d'une charge totale dissoute de 30 g/l ; la conductivité sur toute la gamme d'étude est cependant étroitement corrélée à la salinité ($r = 0,98$). Dans les eaux diluées de la crue, le coefficient de corrélation r est de 0,99. Les deux droites de régression représentées sur la figure 4 ont respectivement les équations suivantes :



— Figure 4 —

Relation conductivité/salinité.

Relation between electrical conductivity and salinity.

- C.E. $> 500 \mu\text{S/cm}$
 $\text{C.E.} = 1,31 \text{ salinité} + 2,135$
 (la conductivité est exprimée en milliSiemens/cm et la salinité en g/l)
- C.E. $< 500 \mu\text{S/cm}$
 $\text{C.E.} = 2,56 \text{ salinité} - 61,167$
 (la conductivité est exprimée en microSiemens/cm et la salinité en mg/l)

2. Evolution de la température et du pH des eaux du Sénégal

a) Variation saisonnière de la température

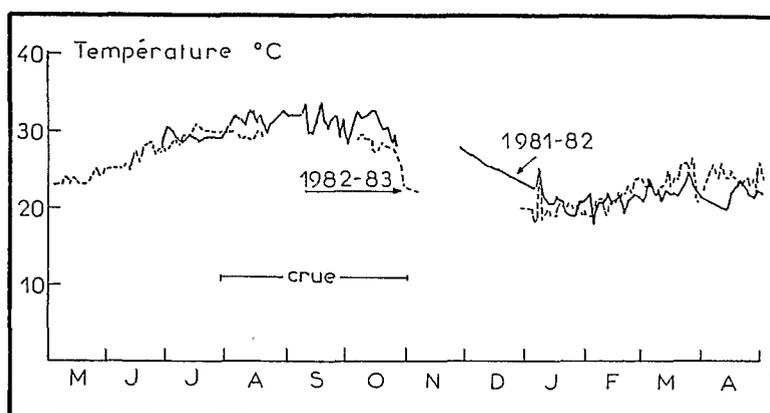
La température des eaux du Sénégal à proximité de son embouchure est très variable (fig. 5). De juin 1981 à avril 1983, les mesures *in situ* révèlent des températures extrêmes de 18,0 °C et de 33,6 °C, la valeur moyenne s'établissant à 26,5 °C. Cette amplitude (15 °C) dans les variations de température est importante et tient à la position géographique de la station d'observation située à l'interface fleuve/océan.

Les températures maximales sont enregistrées au moment des écoulements continentaux, c'est-à-dire de la saison des hautes-eaux. Pendant tout cet épisode (d'août à octobre), les températures se maintiennent entre 28 °C et 33 °C. C'est aussi à cette époque que les températures de l'air ambiant sont les plus élevées.

A partir de la seconde quinzaine d'octobre, la décrue s'amorce, les eaux marines entament leur remontée dans la vallée du Sénégal, les températures décroissent rapidement.

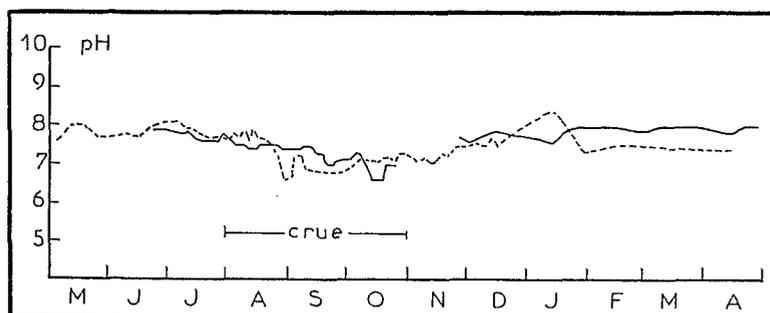
En saison froide, de novembre à mai, les eaux du fleuve sont « froides » ; les températures oscillent autour de 20 °C. C'est l'époque où, sur le littoral, se manifestent les effets d'un « upwelling » côtier qui provoque la remontée des eaux froides de profondeur. Ces effets se surimposent au refroidissement de l'atmosphère ambiant et déterminent les basses températures dans le fleuve.

La comparaison avec les données de LÔ (1984) sur la Gambie à la station purement continentale de Goulombou est très significative. A cette station, située à l'amont de toute influence océanique, les températures restent pratiquement constantes toute l'année.



— Figure 5 —

Variation saisonnière de la température des eaux du Sénégal à St Louis.
Seasonal variation of the temperature of waters from the Senegal river at St Louis.



— Figure 6 —

Variation saisonnière du pH.
Seasonal variation of the pH.

b) Variation saisonnière du pH

Dans l'ensemble, les eaux du Sénégal sont des eaux neutres à légèrement basiques. Les pH oscillent autour d'une valeur moyenne de 7,5 (fig. 6).

En « hivernage », lors de la saison des pluies, les eaux continentales sont faiblement acides (pH de 6,5 à 7,3). En décrue et en étiage, le pH varie très peu autour de 7,8 - 7,9, témoignant aussi de la pénétration de l'eau de mer dans la vallée.

Cette évolution du pH dans les eaux du Sénégal à son embouchure est très peu différente de celle des eaux de la Gambie. Lô (1984) souligne leur relative stabilité entre 7,0 et 7,9.

3. Evolution de la concentration des éléments majeurs

Nous évoquerons brièvement les variations saisonnières des différents anions (chlorure, sulfate et bicarbonate) et des cations (sodium, calcium, magnésium et potassium) avant de présenter plus longuement le cas particulier de la silice dont le comportement à l'interface fleuve/océan est assez singulier.

a) Les anions (fig. 7)

Les teneurs en bicarbonates (HCO_3^-) atteignent les concentrations de cet élément dans l'eau de mer (140 ppm, selon GOLDBERG, 1957) dès le mois d'avril ; l'eau de mer pure s'installe dès lors entre l'embouchure et la ville de St Louis. En période de crue, d'août à octobre, les eaux du fleuve transitent à la station avec des teneurs en bicarbonates comprises entre 15 et 25 mg/l (les carbonates CO_3^{--} ne sont présents qu'en quantités très négligeables, le pH des eaux se maintenant en dessous de 8,3).

Les concentrations en sulfates sont nulles dans les eaux de crue ; cet élément est d'origine marine et n'intervient pas dans le bilan des flux dissous de l'amont.

Les chlorures évoluent parallèlement aux bicarbonates et aux sulfates. Les concentrations excèdent celles de l'eau de mer au maximum de l'intrusion saline dans la vallée du fleuve ; la valeur la plus élevée atteint 21 g/l. Dès l'installation de la crue à la hauteur de St Louis, les teneurs en chlore se stabilisent autour de 10 à 15 mg/l.

L'évolution saisonnière de la charge anionique permet de préciser, pour les deux cycles hydrologiques étudiés, la date du maximum de la salure (donc aussi de l'arrivée des premiers flots de la nouvelle onde de crue), la durée de la phase de retrait du sel et le moment où l'eau douce règne sur tout le bassin du fleuve depuis les hauteurs du Fouta-Djalou jusqu'à l'embouchure. Les salinités maximums ont eu lieu le 12 juillet 1981 et le 19 juillet 1982 ; le retrait total du sel s'est produit le 7 août 1981 et le 25 août 1982. Les deux phases de désalinisation du fleuve ont duré 27 jours en 1981, et 38 jours en 1982.

b) Les cations majeurs (fig. 8)

Le comportement des alcalins (Na, K) et des alcalino-terreux (Ca et Mg) mime celui des anions. Toutes les concentrations augmentent dès que les eaux de l'océan se mélangent aux eaux fluviales. Au niveau des alcalins, et au maximum de la pénétration saline, les concentrations sont supérieures à celles de l'eau de mer. En revanche, on remarque que ceci n'est qu'exceptionnel pour le calcium et le magnésium : pendant le cycle 1982/1983, les concentrations en alcalino-terreux restent inférieures aux teneurs dans l'eau de mer. Ces éléments seraient donc « sollicités » dans des cycles biogéochimiques du fait du fonctionnement en estuaire « inverse » : ils seraient partiellement piégés (12 %) dans les petites cuvettes où l'eau de mer, concentrée par évaporation, effectue de fréquents allers et retours.

Au moment de la crue, la concentration de tous les cations décroît brutalement. Les teneurs sont peu variables pendant cette courte période de 2 à 3 mois : 10 mg/l (Na), 4 mg/l (Ca), de 2 à 3 g/l pour le K et le Mg.

c) Le rapport chlorure/sodium

Le rapport chlorure/sodium varie très peu pendant 9 à 10 mois de l'année autour de sa valeur moyenne dans l'eau de mer ($\text{Na/Cl} = 1,81$, concentrations en mg/l).

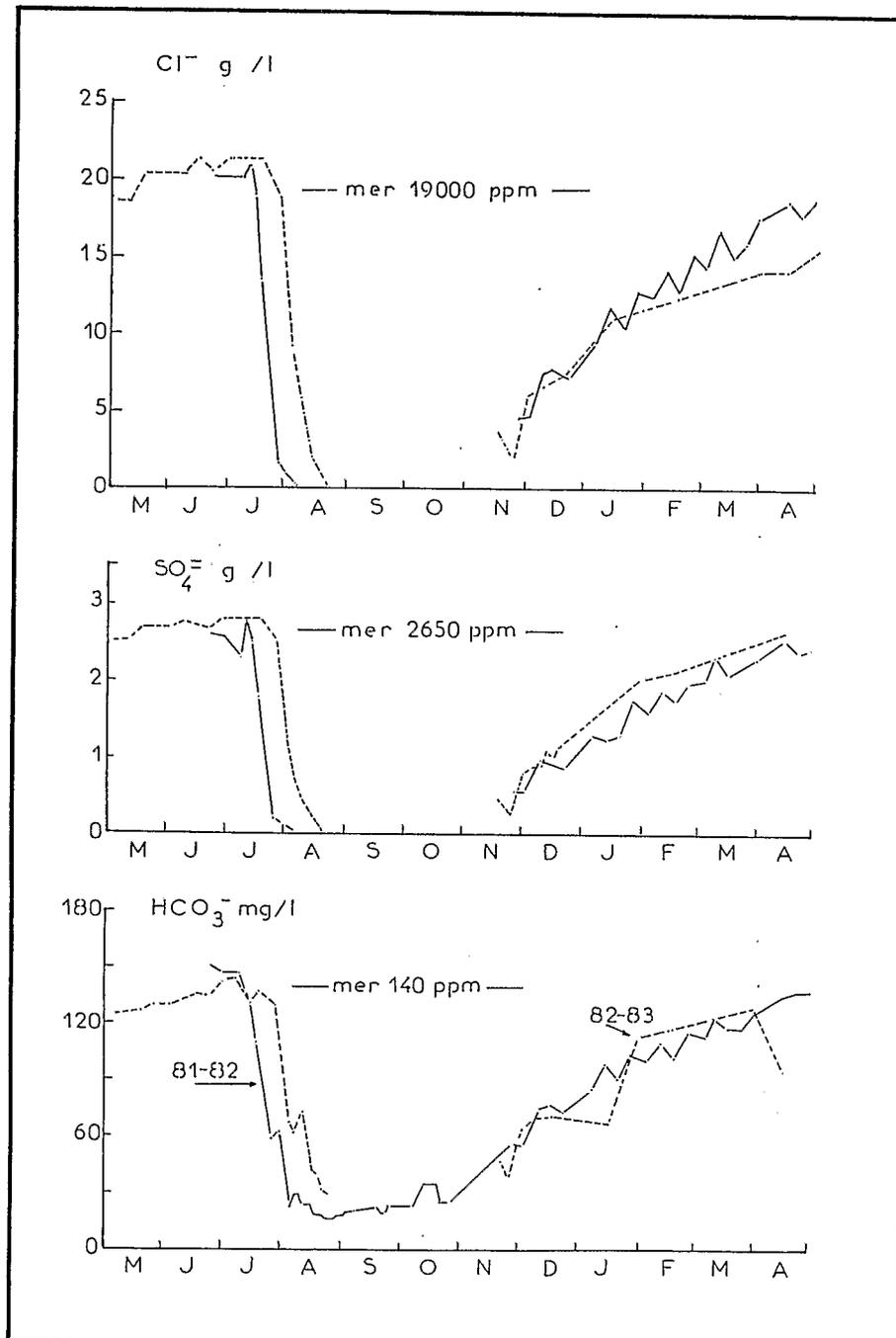


Fig. 7 — Evolution de la concentration des anions.
Evolution of anionic concentrations.

La figure 9 illustre les variations de ce rapport au cours des deux cycles hydrologiques étudiés. Il décroît dès que l'apport d'eau douce se ressent à la hauteur de la ville de St Louis, traduisant ainsi la présence négligeable du chlorure dans les apports fluviaux.

d) *La silice*

A l'inverse de tous les autres éléments dissous, la teneur en silice augmente dès que la crue annuelle atteint

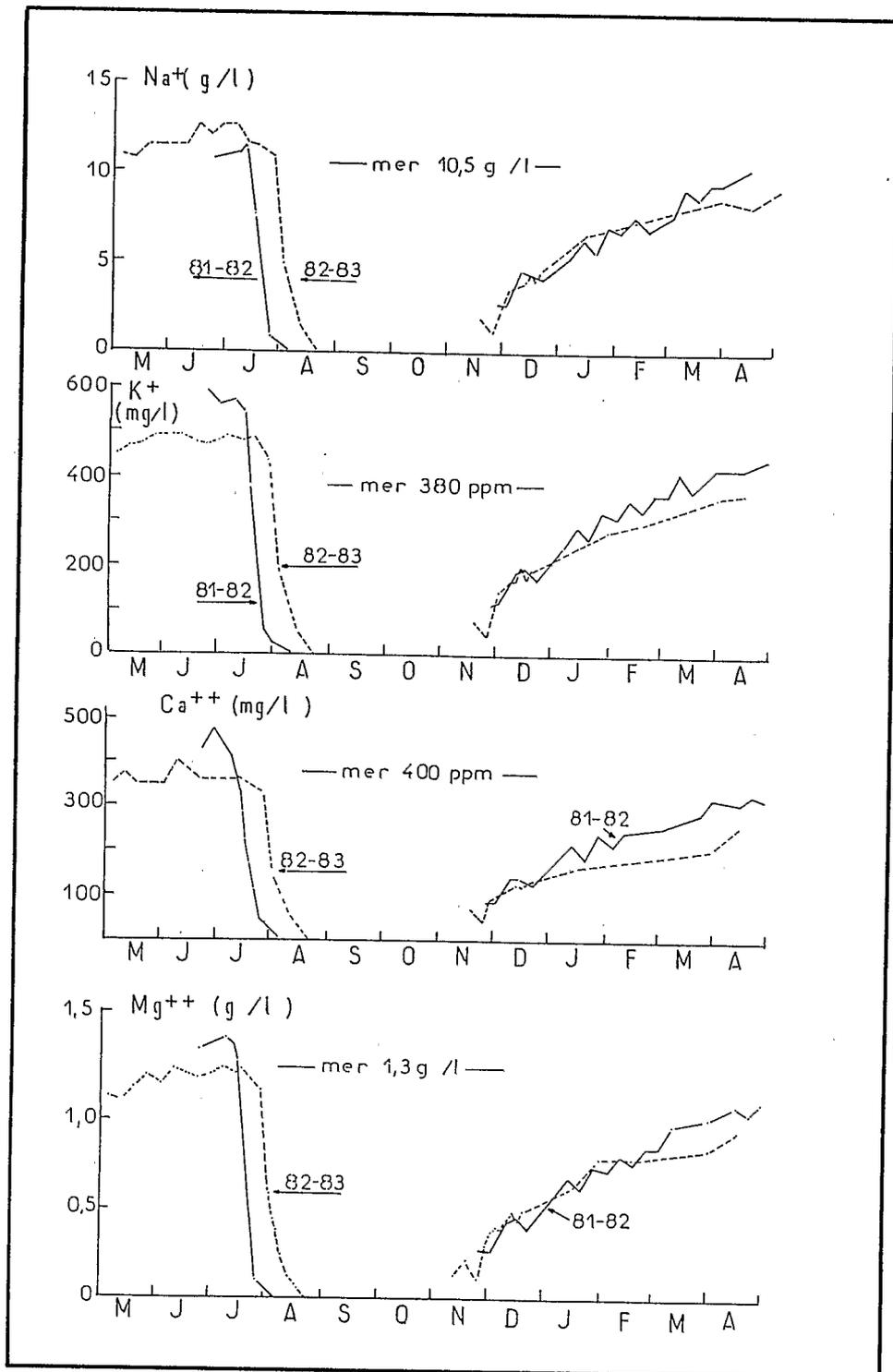


Fig. 8 — Evolution de la concentration des cations majeurs.
Evolution of the concentration of major cations.

l'embouchure (fig. 10). Cette particularité du comportement de la silice dissoute à l'interface fleuve/océan dans les milieux estuariens est bien connue et beaucoup d'études y ont été consacrées aussi bien sur le terrain qu'en laboratoire : BIEN *et al.* (1958), SCHINK (1967), MONNET (1972), LISS et POINTON (1973), SHOLKOVITZ (1976),

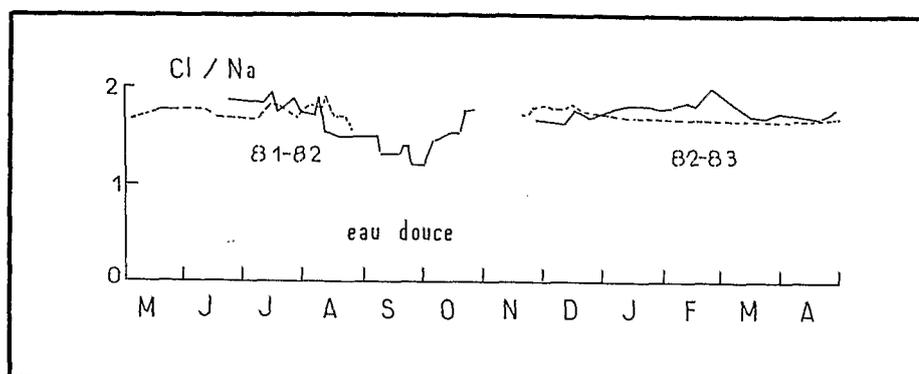


Fig. 9 — Variation du rapport chlorure/sodium.
Variation of the chloride/sodium ratio.

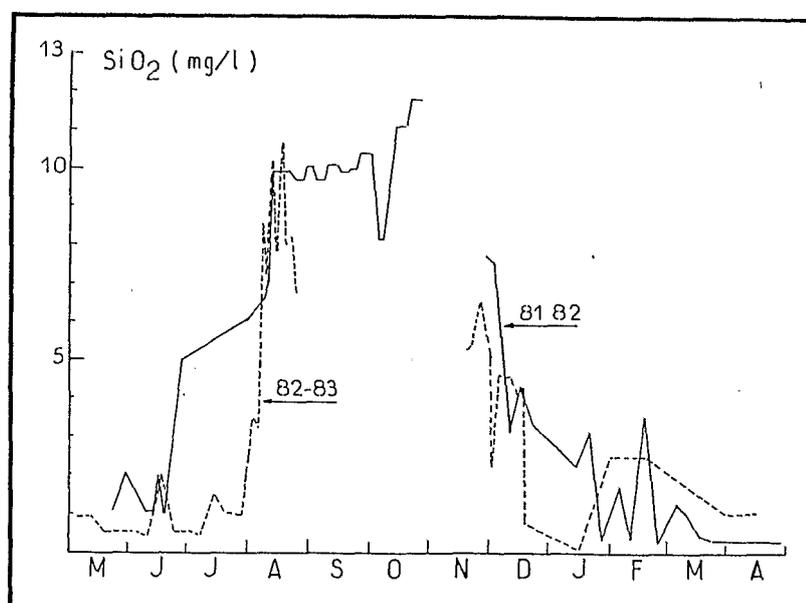


Fig. 10 — Evolution de la concentration en silice.
Evolution of silica concentration.

ASTON (1983), SPENCER (1983), WOLLAST et MACKENZIE (1983). Que ce soit au laboratoire ou *in situ*, les résultats sont assez contradictoires et les opinions très divergentes sur le caractère conservatif ou non conservatif de la silice dans les eaux saumâtres des estuaires.

La figure 11 illustre les variations des teneurs en silice en fonction de la chlorinité. Dans l'ensemble, dès que la chlorinité augmente, les concentrations en silice diminuent, mais cette décroissance de la silice dissoute s'écarte fortement de la courbe théorique de dilution établie par BIEN *et al.* (1958). Le mélange eau douce / eau de mer ne correspond donc pas pour la silice à un simple phénomène de dilution ; d'autres facteurs interviennent pour introduire des pertes en silice qui peuvent atteindre de 20 à 30 % lorsque les proportions d'eau de mer et d'eau fluviale sont semblables. Ces pertes sont du même ordre de grandeur que les estimations de LISS et POINTON (1973) dans l'estuaire de l'Alde (Grande-Bretagne), de BIEN *et al.* (1958) dans l'estuaire du Mississippi, mais sont en total désaccord avec d'autres études entreprises sur les estuaires japonais, chinois et sur l'Orénoque où la relation entre la silice et la salinité est linéaire.

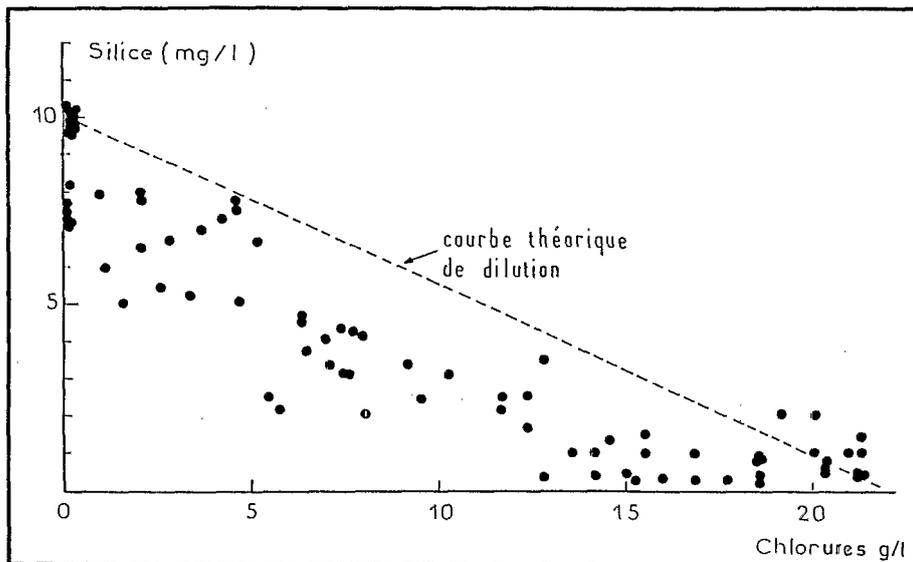


Fig. 11 — Variation de la concentration en silice en fonction de la salinité.
Variation of the silica concentration as a function of salinity.

II — EVALUATION DES FLUX DISSOUS D'ORIGINE CONTINENTALE

L'invasion marine annuelle de la basse vallée du Sénégal rend impossible l'évaluation de l'apport continental en éléments dissous à partir des données analytiques de la ville de St Louis. Nous venons de voir que même pendant l'écoulement de la crue, les effets secondaires de la langue salée qui l'a précédé sont ressentis à cette station. Force a donc été de prendre comme référence les données obtenues plus à l'amont au poste de Dagana (à 192 km de l'embouchure). Lorsque ce site était lui-même atteint par le biseau salé (du 1er mai au 5 août 1981 et du 5 mars au 30 avril 1982 pour le cycle 1981/1982, du 1er mai au 4 août 1982 et du 17 février au 30 avril 1983 pour le cycle 1982/1983) (fig. 12), les stations de Podor et/ou de Guédé ont été prises en compte. Le bilan 1981/1982 a ainsi pu être établi à partir de 208 analyses de l'ensemble des éléments majeurs.

1. Evolutions saisonnières de la charge anionique et cationique

Les variations saisonnières des teneurs en anions et en cations sont essentiellement tributaires de l'importance des écoulements (fig. 13).

a) Les anions

Les teneurs en bicarbonates (HCO_3^-) varient de 20 mg/l en crue à 45 mg/l en basses-eaux. Ils constituent la composante principale de la charge en solution avec une concentration moyenne de 24 mg/l.

Les chlorures (Cl^-) constituent un cas particulier. Les teneurs sont en général de l'ordre de 1,5 mg/l : elles peuvent cependant atteindre de mai à juillet des valeurs supérieures à 4 mg/l. En fin d'étiage, ces concentrations élevées peuvent résulter de la prise en compte (même très loin en amont) d'eaux atteintes par l'intrusion de la langue salée. En juillet, les teneurs en chlorure sont vraisemblablement à porter au crédit des eaux météoriques chargées en chlorure et en sodium.

Les sulfates sont peu abondants dans les eaux du Sénégal. Ils sont essentiellement d'origine marine et les concentrations indiquées dans le tableau I sont peu significatives. Les valeurs d'octobre, en particulier, sont vraisemblablement dues à des erreurs analytiques ou à des phénomènes de pollution.

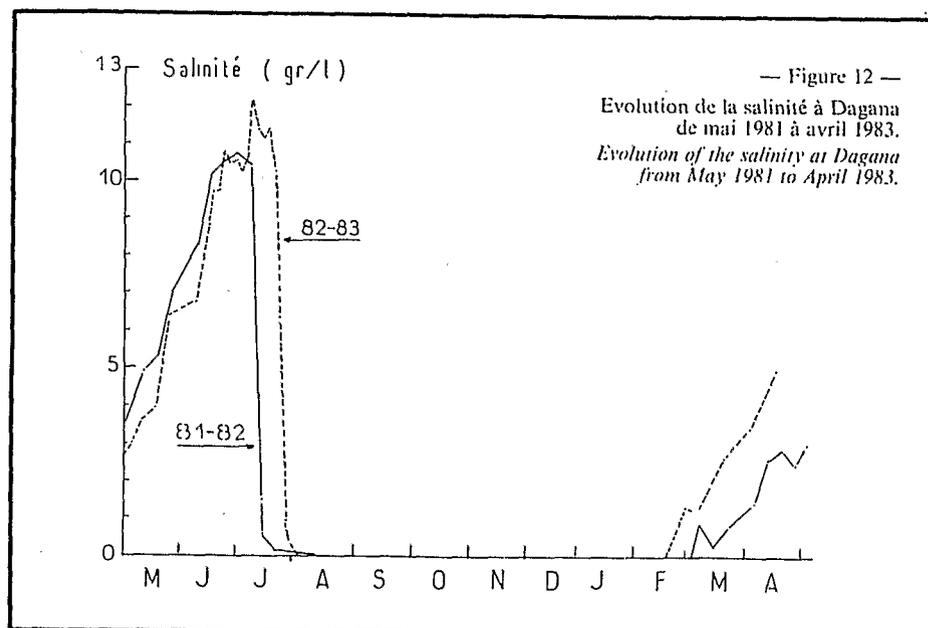


Tableau I
Composition chimique des eaux du fleuve Sénégal. Concentrations moyennes mensuelles (en mg/l)
Chemical composition of the river Senegal waters. Mean monthly concentration (mg/l)

| Mois | HCO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | SO ₄ ⁼ | Σ anions (méq/l) | Ca ⁺⁺ | Mg ⁺⁺ | K ⁺ | Na ⁺ | Σ cations (méq/l) | SiO ₂ | Charge Totale |
|----------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|---------------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|----------------------|------------------|------------------|
| Mai | 44.00 | 3.41 | 1.12 | 0.840 | 6.89 | 3.63 | 1.80 | 3.40 | 0.838 | 8.38 | 72.63 |
| Juin | 44.55 | 6.17 | 0.53 | 0.914 | 7.26 | 4.02 | 1.80 | 4.34 | 0.929 | 6.98 | 75.65 |
| Juillet | 44.55 | 3.54 | 0.47 | 0.910 | 6.80 | 4.01 | 1.95 | 3.68 | 0.870 | 6.48 | 71.48 |
| Août | 21.47 | 1.12 | 0.15 | 0.387 | 2.85 | 1.51 | 1.90 | 1.71 | 0.386 | 6.69 | 37.41 |
| Septembre | 20.98 | 1.23 | 0 | 0.383 | 2.92 | 1.41 | 1.70 | 1.78 | 0.381 | 7.70 | 37.74 |
| Octobre | 25.61 | 1.30 | 0.43 | 0.465 | 3.58 | 1.81 | 1.89 | 2.02 | 0.462 | 8.57 | 45.21 |
| Novembre | 30.03 | 1.51 | 0 | 0.534 | 4.32 | 2.12 | 1.95 | 2.05 | 0.527 | 7.87 | 49.85 |
| Décembre | 30.95 | 1.27 | 0 | 0.543 | 4.25 | 2.47 | 1.46 | 2.07 | 0.542 | 8.57 | 51.04 |
| Janvier | 32.97 | 0.97 | 0 | 0.567 | 4.55 | 2.65 | 1.26 | 2.05 | 0.565 | 8.03 | 52.48 |
| Février | 35.93 | 1.83 | 0 | 0.640 | 4.90 | 3.18 | 1.43 | 2.22 | 0.638 | 8.57 | 58.06 |
| Mars | 39.40 | 1.27 | 0 | 0.680 | 5.40 | 3.25 | 1.43 | 2.05 | 0.662 | 8.49 | 61.29 |
| Avril | 43.75 | 1.18 | 0 | 0.750 | 6.40 | 3.50 | 1.36 | 2.48 | 0.751 | 9.59 | 68.26 |
| Année | 24.36 | 1.32 | 0.15 | 0.434 | 3.39 | 1.75 | 1.81 | 1.92 | 0.443 | 7.64 | 42.35 |
| % de la Charge dissoute | 57.5 % | 3.1 % | 0.4 % | - | 8.0 % | 4.1 % | 4.3 % | 4.5 % | - | 18.1 % | - |

b) Les cations

Tous les cations évoluent parallèlement, à l'exception du potassium (K) dont la concentration est pratiquement constante toute l'année autour d'une valeur moyenne de 1.8 mg/l. Le potassium dissous serait donc totalement indépendant de l'importance des écoulements : autrement dit, quels que soient les chemins empruntés par les eaux (ruissellement, hypodermique ou souterrain), avant de rejoindre le drain principal, il n'y a aucune dilution ou concentration en potassium.

Le sodium et les alcalino-terreux (calcium et magnésium) ont des comportements similaires. Les teneurs diminuent simultanément au passage de la crue puis elles ne cessent d'augmenter progressivement lors de la décrue, des phases de tarissement et d'épuisement.

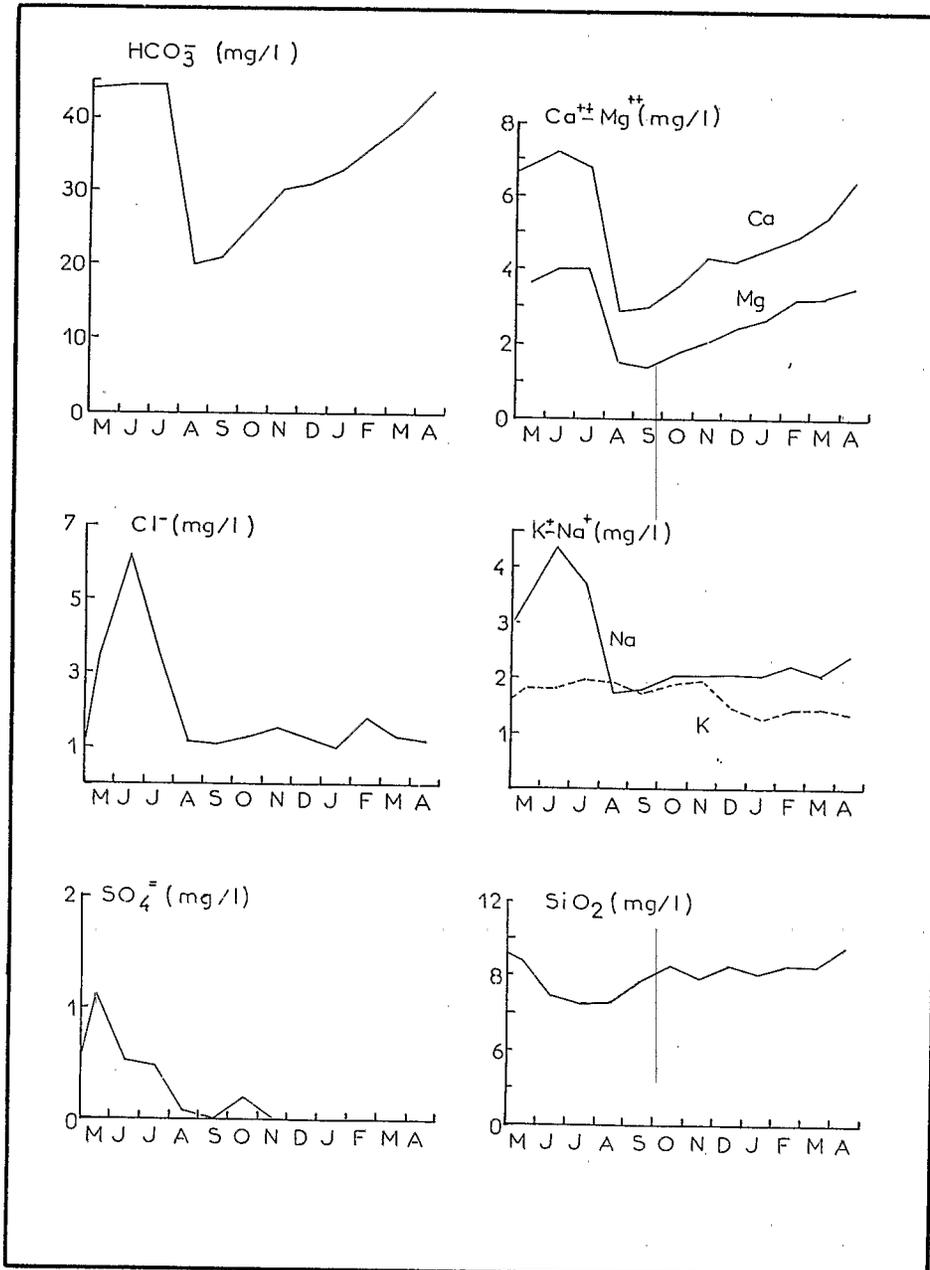


Fig. 13 — Evolution saisonnière de la charge anionique et cationique.
 Seasonal evolution of the anionic and cationic dissolved charge.

c) La silice

Les concentrations en silice dissoute varient très peu toute l'année ; elles oscillent autour d'une valeur moyenne de 7,6 mg/l. Cette relative stabilité donne de la « crédibilité » au bilan établi sur les flux dissous d'origine continentale. Nous avons vu en effet qu'à l'interface océan/fleuve les teneurs en silice diminuaient considérablement.

2. Evolution saisonnière de la charge dissoute

Le tableau I donne la composition moyenne des eaux du Sénégal à son embouchure. Rappelons que nous avons fait abstraction de l'intrusion saline et qu'il ne s'agit ici que de la charge en solution acquise par le fleuve sur les bassins versants de l'amont et au cours de son transit dans la portion de la vallée alluviale située en dehors de l'influence marine.

La charge dissoute moyenne est de 42,35 mg/l. Les valeurs extrêmes sont observées en fin d'étiage (76 mg/l en juin) et à la pointe de crue (37 mg/l en août et septembre). Les eaux du Sénégal ont une charge en solution tout à fait comparable (tabl. II) à celle de la Gambie (52 mg/l), du Niger (67 mg/l), du Chari (58 mg/l) et de son affluent l'Ouham (55 mg/l), du Congo (33 mg/l), du Bandama (87 mg/l) et de l'Amazone (52 mg/l).

Tableau II
Comparaison de la composition chimique (mg/l) des eaux du Sénégal à celles d'autres rivières africaines et du monde
Comparison of the chemical composition (mg/l) of the river Senegal to other african and world rivers

| | Sénégal | Gambie (1) | Zaïre (2) | Niger (3) | Bandama (4) | Ouham (5) | Chari (6) | | Nil (7) | Amazone (8) | Monde (9) |
|------------------|---------|------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|------|---------|-------------|-----------|
| | | | | | | | amont | aval | | | |
| HCO ₃ | 24.36 | 24.30 | 11.2 | 36.0 | 35.5 | 23.7 | 28.1 | 32.3 | 154.0 | 22.5 | 52.8 |
| Cl | 1.32 | 0.90 | 2.85 | 0.8 | 2.5 | 0.5 | 0.1 | 0.1 | 7.7 | 3.9 | 6.55 |
| SO ₄ | 0.15 | 0.1 | 2.95 | 2.3 | 2.1 | 0.8 | 0.1 | 0.1 | 9.0 | 3.0 | 9.3 |
| Ca | 3.39 | 7.90 | 2.4 | 6.1 | 4.1 | 2.39 | 3.5 | 4.1 | 25.0 | 6.5 | 13.8 |
| Mg | 1.75 | 3.20 | 1.3 | 2.2 | 2.5 | 1.44 | 1.8 | 1.9 | 7.0 | 1.0 | 3.45 |
| K | 1.81 | 1.40 | 1.1 | 1.5 | 2.2 | 2.00 | 1.8 | 1.9 | 4.0 | 1.0 | 1.35 |
| Na | 1.92 | 2.20 | 1.7 | 2.7 | 5.3 | 2.78 | 2.8 | 2.9 | 17.0 | 3.1 | 5.85 |
| SiO ₂ | 7.64 | 12.60 | 9.8 | 15.4 | 19.8 | 21.5 | 19.8 | 21.8 | 21.0 | 11.2 | 10.4 |
| Total | 42.34 | 52.50 | 33.3 | 67.0 | 74.0 | 55.1 | 57.8 | 64.9 | 224.7 | 52.2 | 93.50 |

(1) : LO, 1984 ; (2) : MEYBECK, 1978 ; (3) : IMEVBORÉ, 1970 ; (4) : MONNET, 1972 ; (5) : GAC et PINTA, 1972 ; (6) : GAC, 1979 ; (7) : HURST, 1954 ; COCHE ET BALON, 1974 ; SHANIN, 1985 ; (8) : GIBBS, 1972 ; (9) : MEYBECK, 1984.

3. Le bilan de l'altération chimique. Flux mensuels et annuels en éléments dissous

En 1981/1982, les flux dissous, d'origine continentale, qui ont transité à l'embouchure du fleuve Sénégal, se sont élevés à 500 000 tonnes (tabl. III). Ces apports véhiculés par des écoulements de $11,784.10^9$ m³ correspondent à une charge dissoute moyenne annuelle de 42,3 mg/l. Le taux d'érosion chimique annuel pour l'ensemble du bassin serait de 1,85 t/km²/an, valeur très faible mais du même ordre de grandeur que l'estimation de LÔ (1984) pour la Gambie (1,0 t/km²/an).

La répartition mensuelle donnée dans le tableau III montre que les apports en solution sont largement dépendants des volumes écoulés. Les mois d'août, de septembre, d'octobre et de novembre qui représentent 91 % de l'écoulement annuel totalisent aussi 87 % des flux dissous. Ceci signifie que la minéralisation des eaux varie peu d'une saison à l'autre et d'une année à l'autre. En admettant une charge dissoute moyenne annuelle comparable en 1982/1983 à celle de 1981/1982, on évalue que, pour un volume écoulé de $8,01.10^9$ m³, l'apport dissous en 1982/1983 a été de l'ordre de 340 000 tonnes.

La comparaison avec les flux de matières en suspension évalués par GAC et KANE (1986) montre qu'en termes de bilan l'érosion continentale sous forme particulaire (2 865 000 tonnes) est de 5 à 6 fois supérieure à celle sous forme dissoute. Au niveau du bassin versant du Sénégal, il y a donc à l'heure actuelle un déséquilibre très marqué entre l'érosion mécanique et l'altération chimique.

Les taux d'érosion mécanique et chimique spécifiques réunis ($12,45 \text{ t/km}^2/\text{an}$) restent cependant modestes comparativement à ceux d'autres rivières africaines (Congo : $22,4 \text{ t/km}^2/\text{an}$, Zambèze : $45,9 \text{ t/km}^2/\text{an}$, Niger : $33,0 \text{ t/km}^2/\text{an}$, Nil : $30 \text{ t/km}^2/\text{an}$, Orange : $20,2 \text{ t/km}^2/\text{an}$, Bandama : $17,3 \text{ t/km}^2/\text{an}$) et américaines (Amazonie : $124 \text{ t/km}^2/\text{an}$, Mississippi : $134 \text{ t/km}^2/\text{an}$).

Tableau III

Evaluation des flux dissous continentaux à l'embouchure du Sénégal (mai 1981 - avril 1982 ; en tonnes) (N : nombre d'analyses)

Estimation of the continental dissolved load at the mouth of the Senegal river (May 1981 - April 1982 ; in tons) (N : number of samples)

| Mois | N | Volume (en 10^9 m^3) | HCO ₃ | Cl | SO ₄ | Ca | Mg | K | Na | SiO ₂ | Total |
|-----------|-----|------------------------------------|------------------|----------|-----------------|----------|----------|----------|----------|------------------|-----------|
| Mai | 12 | 1.937 | 85.23 | 6.61 | 2.18 | 13.35 | 7.04 | 3.49 | 6.59 | 16.24 | 140.73 |
| Juin | 13 | 0.778 | 34.66 | 4.80 | 0.41 | 5.65 | 3.13 | 1.40 | 3.38 | 5.43 | 58.86 |
| Juillet | 13 | 401.76 | 17890.3 | 1424.2 | 192.8 | 2731.9 | 1612.1 | 783.4 | 1478.4 | 2603.4 | 28716.5 |
| Août | 25 | 3028.32 | 65022.2 | 3396.4 | 452.0 | 8627.9 | 4586.1 | 5761.8 | 5190.6 | 20268.5 | 113305.5 |
| Septembre | 32 | 4058.18 | 85151.7 | 4933.9 | 0 | 11887.9 | 5755.9 | 6938.6 | 7225.9 | 31265.4 | 153159.3 |
| Octobre | 20 | 2598.47 | 66555.5 | 3394.2 | 1134.3 | 9317.1 | 4722.3 | 4919.4 | 5254.8 | 22274.3 | 117571.9 |
| Novembre | 20 | 1047.24 | 31453.6 | 1591.3 | 0 | 4519.8 | 2224.0 | 2049.3 | 2155.0 | 8246.3 | 52239.2 |
| Décembre | 15 | 383.72 | 11876.9 | 486.5 | 0 | 1630.8 | 947.5 | 561.0 | 795.2 | 3228.5 | 19526.4 |
| Janvier | 16 | 162.93 | 5244.6 | 155.0 | 0 | 724.5 | 422.8 | 201.6 | 327.0 | 1277.0 | 8352.5 |
| Février | 18 | 67.50 | 2426.0 | 123.6 | 0 | 330.9 | 215.0 | 96.8 | 150.0 | 578.8 | 3921.1 |
| Mars | 12 | 26.14 | 1030.3 | 33.4 | 0 | 141.4 | 85.1 | 37.6 | 53.6 | 222.0 | 1603.4 |
| Avril | 12 | 7.46 | 326.38 | 8.78 | 0 | 47.78 | 26.12 | 10.13 | 18.48 | 71.57 | 509.24 |
| Année | 208 | 11,784,10 ⁹ | 287097.57 | 15558.69 | 1781.69 | 39978.98 | 20607.09 | 21364.52 | 22658.95 | 90037.44 | 499104.67 |

III — LE BILAN DE L'ÉROSION MÉCANIQUE ET DE L'ALTÉRATION CHIMIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DU SÉNÉGAL.

APPROCHE DES MÉCANISMES QUI PRÉSIDENT À L'ACQUISITION DE LA CHARGE SOLIDE ET DISSOUE DES FLEUVES SAHÉLIENS

L'importance relative des deux grands processus de l'érosion continentale a été établie à partir de l'évaluation des flux dissous que nous venons de préciser et de l'estimation des transferts de matières particulières (GAC *et al.*, 1986).

1. Importance relative de l'altération chimique et de l'érosion mécanique

Certains éléments utilisent la voie soluble, d'autres la voie particulaire et quelques-uns empruntent les deux itinéraires pour migrer vers les points-bas des bassins versants. Trois remarques s'imposent au préalable.

— Dans la phase soluble, nous avons mis en évidence l'importance (57 %) des bicarbonates. En réalité, « leur présence dans l'artère fluviale ne provient que très peu de la dissolution de roches carbonatées et ne s'explique que par l'intervention du CO₂ atmosphérique amené par les eaux d'infiltration » (GAC et PINTA, 1972).

— Aux matières en suspension issues des horizons superficiels des sols de l'amont et des berges de la vallée alluviale, il faut également ajouter les apports éoliens, conséquence d'un développement sans précédent du phénomène des brumes sèches. En effet, ils représentent des quantités non négligeables (GAC et TRAVI, 1984 ; GAC, 1985) et ils sont pris en compte, bien que pour l'essentiel leurs régions d'origine soient situées en dehors du bassin versant du Sénégal.

— Enfin, il faut garder à l'esprit que les deux cycles hydrologiques étudiés correspondent à des années de très faible hydraulité. Les eaux du fleuve sont restées cantonnées dans le lit mineur ; les déversements vers les plaines d'inondation ont été insignifiants et n'ont donné lieu qu'à une sédimentation fine très limitée dans le lit majeur. La sédimentation, qu'elle soit à caractère détritique ou chimique, s'est organisée dans deux sites de

dépôts : le milieu lacustre représenté par le lac de Guiers en rive gauche du fleuve Sénégal et le milieu océanique. Les flux de matières à l'embouchure ne représentent donc pas l'intégralité des apports continentaux : une partie du « capital » livré par l'amont et les berges de la vallée est « court-circuitée » vers le lac de Guiers.

Au cours des deux cycles arides 1981/1982 et 1982/1983, les flux de matière à l'embouchure du Sénégal se sont respectivement élevés à 3 365 000 tonnes. La répartition entre matière minérale et matière organique s'établit de la façon suivante :

| | 1981/1982 | | 1982/1983 | |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| matière organique | 44 680 | (1,33 %) | 22 836 | (1,50 %) |
| matière en suspension | 2 820 565 | (83,84 %) | 1 163 067 | (75,26 %) |
| matière en solution | 499 105 | (14,83 %) | 339 224 | (22,24 %) |
| (tonnes) | 3 364 350 | | 1 525 127 | |

En moyenne, sur les deux cycles, les exportations de matières à l'embouchure du Sénégal sont de l'ordre de 2 445 000 tonnes dont : 80,0 % pour les particules fines en suspension, 18,6 % pour les substances dissoutes, 1,4 % pour la matière organique.

| ELEMENTS COMMUNS | suspensions | dissous | total |
|---------------------|-------------|-------------------------------|---------|
| Si | 661 900 | 42 100 | 703 000 |
| K | 40 300 | 21 100 | 61 700 |
| Mg | 20 800 | 20 600 | 41 400 |
| Ca | 5 000 | 40 000 | 45 000 |
| Na | 4 200 | 22 700 | 26 900 |
| ELEMENTS DIFFERENTS | suspensions | dissous | |
| Al | 358 700 | HCO ₃ ⁻ | 287 100 |
| Fe | 192 300 | Cl ⁻ | 15 600 |
| Ti | 15 700 | SO ₄ ²⁻ | 1 800 |
| Mn | 800 | PO ₄ ³⁻ | 300 |

Au niveau de l'ensemble du bassin versant du Sénégal, l'exportation (toutes formes figurées ou dissoutes confondues) relative des éléments est la suivante :

Si > Al > Fe > K > Ca > Mg > Na > Ti > Mn

Les éléments empruntent cependant des voies différentes pour atteindre l'océan (fig. 14) :

- l'aluminium, le fer, le titane et le manganèse sont uniquement évacués sous formes figurées avec les matières en suspension ;
- le bicarbonate, le chlore, le sulfate et le phosphate, qui ne sont pas à proprement parler originaires du bassin, migrent vers l'aval avec la phase dissoute ;
- la silice et le potassium accompagnent plutôt la phase en suspension (94 % et 65 %) que la phase soluble (6 % et 35 %). Le potassium quitte le bassin avec les éfifices micacés ; la silice demeure le constituant essentiel des matières en suspension ;
- le magnésium se partage de manière sensiblement égale entre les deux phases ;
- enfin, le calcium et le sodium sont principalement exportés sous forme dissoute (89 % et 84 %).

La « roche sédimentaire » qui correspondrait à ces flux dissous et particuliers aurait comme composition chimique (exprimée en % d'oxydes) : SiO₂ : 55,14 % ; Al₂O₃ : 24,86 % ; Fe₂O₃ : 10,07 % ; TiO₂ : 0,99 % ; Mn₃O₄ : 0,04 % ; Na₂O : 1,35 % ; K₂O : 2,72 % ; MgO : 2,52 % ; CaO : 2,31 %.

Selon la classification établie par GARRELS et MACKENZIE (1971) à partir de la composition chimique de différents types de sédiments détritiques, cette « roche sédimentaire » se situe dans le pôle argileux. Sa composition chimique se situe entre celles des argiles rouges des grands fonds océaniques et celle d'un mélange pur d'illite et de montmorillonite. L'influence continentale serait donc prédominante dans la sédimentation argileuse océanique. Ce résultat rejoint les réflexions de MILLIOT (1964) qui écrit : « Nous conviendrons au départ que l'unanimité est faite sur l'origine continentale des argiles marines qui miment en gros, dans chaque océan ou chaque partie d'océan, les caractéristiques des roches, des altérations et des sols du continent voisin », en précisant cependant que « les argiles marines ne sont que l'écho déformé des argiles héritées par les rivières » sous l'effet des phénomènes de transformation et de sédimentation différentielle.

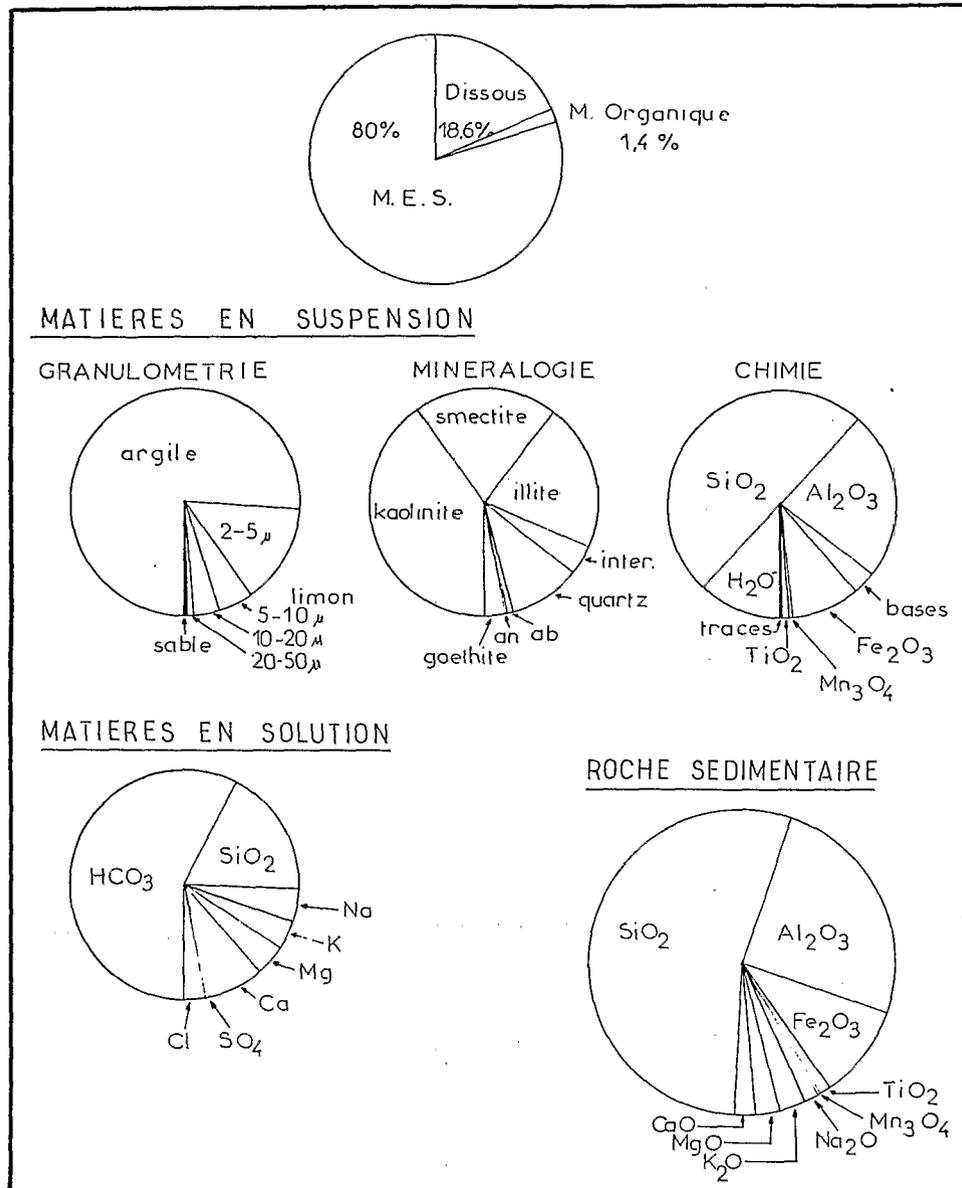


Fig. 14 — Flux de matière dans le fleuve Sénégal.
Flux of matter in the river Senegal.

Les taux d'érosion mécanique et chimique réunis représentent un soutirage de matière de l'ordre de 12,5 t/km²/an ou encore de 125 kg/ha/an, valeurs qui restent faibles comparativement aux autres rivières africaines. En une année, et en se basant sur une densité moyenne de 2,25, les reliefs s'éroderaient de 6 µm environ et il faudrait de l'ordre de 170 000 ans, dans les conditions d'aridité actuelles, pour provoquer un abaissement général du paysage d'une hauteur de 1 m.

2. Acquisition de la charge solide et de la charge dissoute. Importance du ruissellement et rôle des nappes souterraines

a) Hypothèse du ruissellement à charge solide instantanée maximum. Evaluation du volume ruisselé

Le bilan des flux de matières particulières à l'embouchure du Sénégal s'écrit :

$$V_{emb} \cdot C_{emb} = V_r C_r + V_n C_n \quad (I)$$

avec $V_{emb} = V_r + V_n$

(les volumes V sont exprimés en 10^6 m^3 et les charges solides C en mg/l). V_{emb} : volume à l'embouchure (il s'agit des volumes écoulés tous les 5 jours, pas de temps fixé par GAC et KANE, 1986) ; C_{emb} : moyenne sur 5 jours de la concentration des matières en suspension ; V_r : volume ruisselé tous les 5 jours ; V_n : volume fourni par les aquifères tous les 5 jours ; C_r : charge solide instantanée maximum ; C_n : charge solide des eaux souterraines.

On considère que la charge solide acquise dans la phase initiale d'érosion par les premières eaux de ruissellement est maximale (ce maximum étant variable chaque année suivant « l'état » du bassin). Cette hypothèse formulée d'une manière différente par GAC (1979) attribuait au haut bassin du Chari une concentration initiale (C_r) de 1000 mg/l . Dans le cas du Sénégal, cette valeur de C_r a été fixée à 1600 mg/l par GAC et KANE (1986) en suivant les pulsations successives des flux détritiques.

En second lieu, on admet que seul le ruissellement subaérien contribue à l'exportation des matières en suspension. Autrement dit, la charge solide particulière issue des aquifères est nulle.

Le volume ruisselé peut alors être évalué par la relation suivante :

$$V_r = 1600 V_{emb}$$

Cette équation fournit (tous les 5 jours) la répartition du volume total entre l'écoulement superficiel et l'écoulement souterrain (tabl. IV).

Tableau IV
Volume ruisselé (V_r) et volume souterrain en 10^6 m^3 au cours du cycle hydrologique 1981/1982
Runoff volume (V_r) and volume of the well (10^6 m^3) along the hydrological 1981/1982 cycle

| Date | N° | C_{emb} (mg/l) | V_{emb} total | V_r | V_n | V_r/V_t % | Date | N° | C_{emb} (mg/l) | V_{emb} total | V_r | V_n | V_r/V_t % |
|----------|----|---------------------|--------------------|--------|---------|----------------|---------|----|---------------------|--------------------|---------|---------|----------------|
| 1-5/08 | 1 | 645 | 286 | 115 | 171 | 40.2 | 28-1/02 | 37 | 17.2 | 18.50 | 0.20 | 18.30 | 1.1 |
| 6-10 | 2 | 533 | 372 | 124 | 248 | 33.3 | 2-6 | 38 | 20.0 | 16.18 | 0.20 | 15.98 | 1.2 |
| 11-15 | 3 | 580 | 471 | 171 | 300 | 36.3 | 7-11 | 39 | 20.7 | 14.01 | 0.18 | 13.83 | 1.3 |
| 16-20 | 4 | 609 | 550 | 209 | 341 | 38.0 | 12-16 | 40 | 18.1 | 11.98 | 0.14 | 11.84 | 1.2 |
| 21-25 | 5 | 390 | 591 | 144 | 447 | 24.4 | 17-21 | 41 | 15.5 | 10.20 | 0.099 | 10.101 | 1.0 |
| 26-30 | 6 | 297 | 629 | 117 | 518 | 18.6 | 22-26 | 42 | 21.9 | 8.60 | 0.12 | 8.48 | 1.4 |
| Août | | (476.7) | (3029) | (902) | (2127) | (29.8) | Février | | (17.0) | (67.50) | (0.72) | (66.78) | (1.1) |
| 31-4/09 | 7 | 283 | 658 | 116 | 542 | 17.6 | 27-3/03 | 43 | 10.1 | 7.15 | | | |
| 5-9 | 8 | 281 | 678 | 119 | 559 | 17.5 | 4-8 | 44 | 7.7 | 5.92 | | | |
| 10-14 | 9 | 255 | 699 | 112 | 587 | 16.0 | 9-13 | 45 | 5.3 | 4.84 | n.d. | n.d. | n.d. |
| 15-19 | 10 | 243 | 712 | 108 | 604 | 15.2 | 14-18 | 46 | 30.4 | 3.98 | | | |
| 20-24 | 11 | 226 | 653 | 92 | 561 | 14.1 | 19-23 | 47 | 26.1 | 3.26 | | | |
| 25-29 | 12 | 156 | 658 | 64 | 594 | 9.7 | 24-28 | 48 | 15.1 | 2.67 | | | |
| Sept | | (237.5) | (4058) | (602) | (3456) | (14.8) | Mars | | 15.0 | 26.15 | 0.25 | 25.80 | (1.0) |
| 30-4/10 | 13 | 160 | 629 | 63 | 566 | 10.0 | 29-2/04 | 49 | 8.4 | 2.19 | | | |
| 5-9 | 14 | 127 | 562 | 45 | 517 | 8.0 | 3-7 | 50 | 15.1 | 1.80 | | | |
| 10-14 | 15 | 134 | 484 | 40 | 444 | 8.3 | 8-12 | 51 | 5.6 | 1.41 | | | |
| 15-19 | 16 | 138 | 398 | 34 | 364 | 8.5 | 13-17 | 52 | <6.0 | 1.19 | n.d. | n.d. | n.d. |
| 20-24 | 17 | 138 | 299 | 26 | 273 | 8.7 | 18-22 | 53 | <6.0 | 0.98 | | | |
| 25-29 | 18 | 120 | 269 | 20 | 249 | 7.4 | 23-27 | 54 | <6.0 | 0.80 | | | |
| Octobre | | (135.7) | (2598) | (220) | (2378) | (8.5) | Avril | | 5.7 | 7.47 | 0.027 | 7.443 | (0.3) |
| 30-3/11 | 19 | 107 | 223 | 15 | 208 | 6.7 | 28-2/05 | 55 | <6.0 | 0.65 | | | |
| 4-8 | 20 | 105 | 175 | 11.5 | 163.5 | 6.6 | 3-7 | 56 | <6.0 | 0.53 | | | |
| 9-13 | 21 | 100 | 235 | 14.7 | 220.3 | 6.3 | 8-12 | 57 | <6.0 | 0.444 | n.d. | n.d. | n.d. |
| 14-18 | 22 | 92.5 | 193 | 11.2 | 181.8 | 5.8 | 13-17 | 58 | <6.0 | 0.380 | | | |
| 19-23 | 23 | 76.3 | 151 | 7.2 | 143.8 | 4.8 | 18-22 | 59 | <6.0 | 0.335 | | | |
| 24-28 | 24 | 55.1 | 122 | 4.2 | 117.8 | 3.4 | 23-27 | 60 | <6.0 | 0.292 | | | |
| Novembre | | (89.2) | (1047) | (58.4) | (988.6) | (5.6) | Mai | | 5.9 | 2.45 | 0.009 | 2.441 | (0.3) |
| 29-3/12 | 25 | 28.4 | 99.88 | 1.77 | 98.11 | 1.8 | 28-1/06 | 61 | <6.0 | 0.257 | | | |
| 4-8 | 26 | 20.7 | 82.60 | 1.07 | 81.53 | 1.3 | 2-6 | 62 | <6.0 | 0.251 | | | |
| 9-13 | 27 | 19.7 | 69.03 | 0.85 | 68.18 | 1.2 | 7-11 | 63 | <6.0 | 0.255 | n.d. | n.d. | n.d. |
| 14-18 | 28 | 17.8 | 58.23 | 0.65 | 57.58 | 1.1 | 12-16 | 64 | <6.0 | 0.245 | | | |
| 19-23 | 29 | 19.7 | 49.85 | 0.61 | 49.24 | 1.2 | 17-21 | 65 | <6.0 | 0.213 | | | |
| 24-28 | 30 | 14.1 | 43.17 | 0.38 | 42.79 | 0.9 | 22-26 | 66 | <6.0 | 0.157 | | | |
| Décembre | | (19.7) | (383.7) | (4.7) | (379) | (1.2) | Juin | | 11.1 | 1.26 | 0.009 | 1.251 | (0.7) |
| 29-2/01 | 31 | 12.9 | 37.79 | 0.31 | 37.48 | 0.8 | 27-1/07 | 67 | | 0.105 | | | |
| 3-7 | 32 | 13.6 | 33.20 | 0.28 | 32.92 | 0.8 | 2-6 | 68 | | - | | | |
| 8-12 | 33 | 10.2 | 29.51 | 0.19 | 29.32 | 0.6 | 7-11 | 69 | | - | | | |
| 13-17 | 34 | 12.7 | 26.26 | 0.21 | 26.05 | 0.8 | 12-16 | 70 | n.d. | - | n.d. | n.d. | n.d. |
| 18-22 | 35 | 15.0 | 23.53 | 0.22 | 23.31 | 0.9 | 17-21 | 71 | | - | | | |
| 23-27 | 36 | 17.2 | 20.92 | 0.23 | 20.69 | 1.1 | 22-26 | 72 | | - | | | |
| Janvier | | (14.0) | (162.93) | (1.43) | (161.5) | (0.9) | 27-31 | 73 | | - | | | |
| | | | | | | | Juillet | | (10) | (0.5) | (0.003) | (0.497) | (0.6) |

Pour l'ensemble de l'année hydrologique (d'août 1981 à juillet 1982), le volume ruisselé serait de l'ordre de $1,789.10^9 \text{ m}^3$, soit environ 15,2 % du volume total écoulé : plus de 96 % du ruissellement superficiel s'écoulera d'août à octobre (les mois d'août et de septembre rassemblant à eux deux près de 84 % du ruissellement). La « crue » du ruissellement s'établit entre le 16^{ème} et le 20^{ème} jour après l'arrivée des premiers écoulements ; la « crue » des aquifères (écoulements souterrains et hypodermiques confondus), entre le 50^{ème} et le 55^{ème} jour après l'amorce de la nouvelle crue (fig. 5).

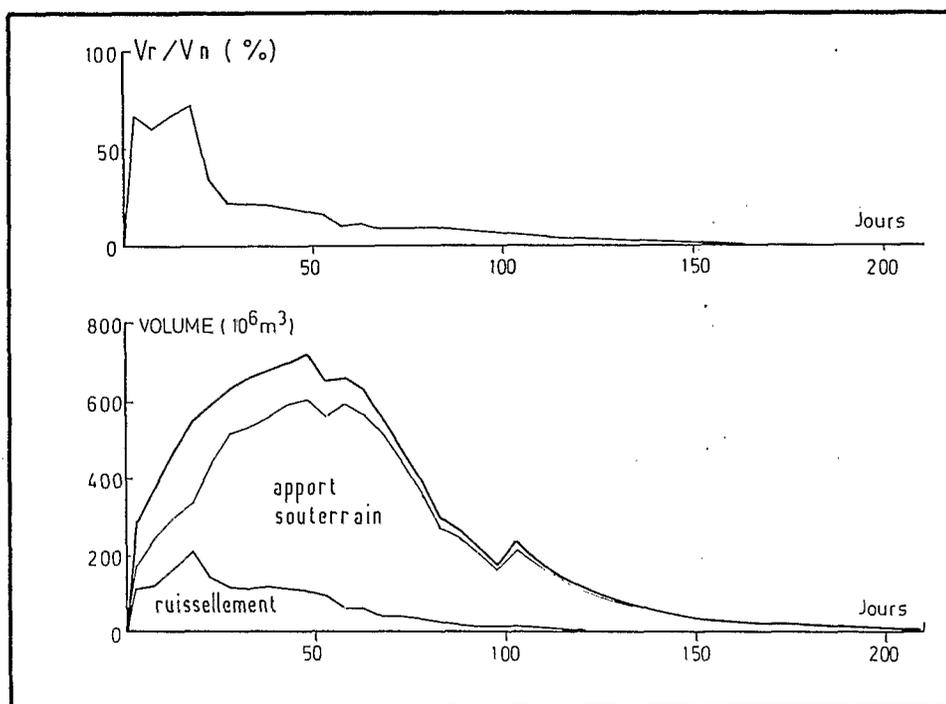


Fig. 15 — Contributions respectives des différents écoulements.
Respective contributions of the different forms of runoff.

b) La charge dissoute des aquifères et du ruissellement superficiel

Pour évaluer la charge dissoute des « aquifères » au sens large, c'est-à-dire de tous les écoulements qui parviennent au drain fluvial après un séjour plus ou moins prolongé dans les sols, on peut, comme dans le cas des calculs menés sur la charge solide, partir des flux de matière dissoute enregistrés à l'embouchure.

L'importance des flux de matières dissoutes peut être établie à partir de l'équation (1) où les différents termes se rapportent à la charge en solution. La seule difficulté réside dans le choix d'une valeur pour la charge dissoute initiale C_r des eaux de ruissellement. Tous les autres termes sont en effet connus : V_n et V_r viennent d'être précisés (tabl. IV), les valeurs de la charge dissoute à l'embouchure ($C_{emb.}$) ont été calculées sur des moyennes de cinq jours lors du cycle hydrologique 1981/1982 (tabl. V).

Plusieurs possibilités peuvent être envisagées.

(1) L'hypothèse absurde des valeurs extrêmes : $C_r = 0$ ou $C_r = 29,76 \text{ mg/l}$, qui correspond à la plus faible charge moyenne en solution observée au cours des périodes successives de 5 jours. Elle coïncide naturellement avec la période du 16 au 20 août où quantitativement le volume ruisselé est le plus important ($209.10^6 \text{ m}^3 / 5 \text{ jours}$).

(2) Des valeurs intermédiaires telles que par exemple des concentrations de 5, 10, 15 et 20 mg/l.

(3) On peut aussi entreprendre la démarche inverse qui consiste à attribuer aux nappes souterraines la charge en solution la plus élevée. A l'échelle mensuelle, elle correspond à celle de juin 1981 (76 mg/l).

Tableau V
Composition chimique moyenne des eaux du Sénégal (mg/l) par périodes de 5 jours de 1981 à 1982
Mean chemical composition of the river Senegal waters (mg/l) over five days periods from 1981 to 1982

| Périodes (t = 5 jours) | N° | Anions | | | Cations | | | | SiO ₂ | Charge totale |
|---------------------------|----|-------------------------------|-----------------|------------------------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|
| | | HCO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | SO ₄ ⁼ | Ca ⁺⁺ | Mg ⁺⁺ | K ⁺ | Na ⁺ | | |
| 1-5/08/81 | 1 | 33.23 | 1.57 | 1.58 | 5.05 | 2.65 | 2.49 | 2.06 | 5.71 | 54.34 |
| 6-10 " | 2 | 31.65 | 0.87 | 0 | 4.42 | 2.45 | 2.04 | 1.81 | 7.06 | 50.30 |
| 11-15 " | 3 | 21.99 | 1.33 | 0 | 2.92 | 1.52 | 1.94 | 1.79 | 7.46 | 38.95 |
| 16-20 " | 4 | 16.90 | 0.70 | 0 | 1.96 | 1.09 | 1.78 | 1.70 | 5.63 | 29.76 |
| 21-25 " | 5 | 17.50 | 1.67 | 0 | 2.23 | 1.16 | 1.93 | 1.77 | 7.45 | 33.71 |
| 26-30 " | 6 | 18.11 | 0.81 | 0 | 2.32 | 1.26 | 1.64 | 1.45 | 6.75 | 32.34 |
| Août 1981 | - | 21.47 | 1.12 | 0.15 | 2.85 | 1.51 | 1.90 | 1.71 | 6.69 | 37.41 |
| 31/8-4/09/81 | 7 | 21.04 | 1.34 | 0 | 2.86 | 1.32 | 1.99 | 2.05 | 6.16 | 36.76 |
| 5-9/09/81 | 8 | 21.29 | 1.45 | 0 | 3.14 | 1.39 | 1.47 | 1.74 | 8.05 | 38.53 |
| 10-14 " | 9 | 19.21 | 1.07 | 0 | 2.46 | 1.22 | 1.70 | 1.80 | 8.47 | 35.93 |
| 15-19 " | 10 | 18.08 | 1.20 | 0 | 2.68 | 1.38 | 1.48 | 1.70 | 7.32 | 33.84 |
| 20-24 " | 11 | 24.08 | 1.20 | 0 | 3.40 | 1.64 | 1.77 | 1.77 | 7.46 | 41.32 |
| 25-29 " | 12 | 21.71 | 0.99 | 0 | 2.93 | 1.42 | 1.87 | 1.67 | 8.70 | 39.29 |
| Septembre 1981 | - | 20.98 | 1.23 | 0 | 2.92 | 1.41 | 1.70 | 1.78 | 7.70 | 37.74 |
| 30/9-4/10/81 | 13 | 23.18 | 0.85 | 0 | 3.07 | 1.63 | 1.93 | 1.54 | 8.70 | 40.9 |
| 5-9/10/81 | 14 | 24.27 | 1.88 | 2.02 | 3.25 | 2.01 | 2.03 | 2.54 | 8.08 | 46.08 |
| 10-14 " | 15 | 24.51 | 1.28 | 0 | 3.17 | 1.69 | 1.94 | 2.10 | 10.13 | 44.82 |
| 15-19 " | 16 | 26.38 | 0.93 | 0 | 3.64 | 1.89 | 1.64 | 1.82 | 8.43 | 44.73 |
| 20-24 " | 17 | 25.27 | 1.36 | 0 | 3.72 | 1.74 | 1.76 | 1.87 | 6.16 | 41.82 |
| 25-29 " | 18 | (34.08) | 1.49 | 0 | 6.03 | 2.02 | 1.92 | 1.93 | 7.39 | (54.86) |
| Octobre 1981 | - | 25.61 | | 0.43 | | | | | | |
| 30/10-3/11/81 | 19 | 26.48 | 1.45 | 0 | 3.70 | 1.81 | 1.94 | 2.10 | 8.33 | 45.81 |
| 4-8/11/81 | 20 | 31.43 | 1.38 | 0 | 4.58 | 2.13 | 1.94 | 2.25 | 8.21 | 51.92 |
| 9-13 " | 21 | 31.25 | 1.50 | 0 | 4.41 | 2.17 | 2.18 | 2.29 | 7.06 | 50.86 |
| 14-18 " | 22 | 29.44 | 1.42 | 0 | 4.45 | 2.11 | 1.97 | 1.76 | 7.99 | 49.14 |
| 19-23 " | 23 | 30.11 | 1.32 | 0 | 4.15 | 2.20 | 1.94 | 2.13 | 7.64 | 49.49 |
| 24-28 " | 24 | 30.06 | 2.40 | 0 | 4.27 | 2.21 | 1.65 | 1.91 | 9.41 | 51.91 |
| Novembre 1981 | - | 30.03 | | 0 | | | | | | |
| 29/11-3/12/81 | 25 | 29.71 | 1.01 | 0 | 4.05 | 2.29 | 1.63 | 1.90 | 8.32 | 48.91 |
| 4-8/12/81 | 26 | 30.40 | 1.07 | 0 | 4.10 | 2.31 | 1.52 | 2.18 | 8.71 | 50.29 |
| 9-13 " | 27 | 29.02 | 1.83 | 0 | 3.90 | 2.41 | 1.50 | 2.20 | 8.96 | 49.82 |
| 14-18 " | 28 | 29.89 | 1.42 | 0 | 3.98 | 2.42 | 1.56 | 2.12 | 8.76 | 50.14 |
| 19-23 " | 29 | 32.76 | 0.36 | 0 | 4.42 | 2.58 | 1.44 | 1.77 | 8.85 | 52.18 |
| 24-28 " | 30 | 35.69 | 1.60 | 0 | 5.18 | 2.98 | 1.32 | 2.12 | 7.65 | 56.54 |
| Décembre 1981 | - | 30.95 | 1.27 | 0 | 4.25 | 2.47 | | | | |
| 29/12-2/1/82 | 31 | 31.79 | 1.71 | 0 | 4.16 | 2.75 | 1.05 | 2.49 | 9.52 | 53.47 |
| 3/1-7/1/82 | 32 | 31.12 | 0.67 | 0 | 4.20 | 2.63 | 1.15 | 1.68 | 8.88 | 50.33 |
| 8-12/12/82 | 33 | 32.45 | 0.99 | 0 | 4.60 | 2.46 | 1.36 | 2.14 | 5.75 | 49.75 |
| 13-17 " | 34 | 34.16 | 0.71 | 0 | 4.80 | 2.68 | 1.36 | 1.95 | 8.30 | 53.96 |
| 18-22 " | 35 | 34.34 | 0.89 | 0 | 4.56 | 2.76 | 1.09 | 2.41 | 8.95 | 55.0 |
| 23-27 " | 36 | 35.38 | 1.60 | 0 | 4.72 | 2.78 | 1.52 | 2.78 | 7.37 | 56.15 |
| Janvier 1982 | - | 32.97 | 0.97 | 0 | 4.55 | 2.65 | 1.26 | 2.05 | | |
| 28/1-1/02/82 | 37 | 33.04 | 1.90 | 0 | 5.05 | 2.88 | 1.22 | 1.75 | 8.99 | 54.84 |
| 2-6/02/82 | 38 | 36.23 | 1.24 | 0 | 4.74 | 3.03 | 1.40 | 2.46 | 8.36 | 57.46 |
| 7-11 " | 39 | 35.62 | 2.94 | 0 | 4.90 | 3.32 | 1.48 | 2.55 | 8.05 | 58.86 |
| 12-16 " | 40 | 33.85 | 3.01 | 0 | 4.90 | 3.46 | 1.36 | 1.72 | 8.65 | 56.95 |
| 17-21 " | 41 | 37.70 | 0.64 | 0 | 4.98 | 3.16 | 1.48 | 2.05 | 8.35 | 58.36 |
| 22-26 " | 42 | 36.29 | 1.06 | 0 | 5.05 | 3.00 | 1.44 | 2.00 | 10.10 | 58.95 |
| Février 1982 | - | 35.93 | 1.83 | | 4.90 | 3.18 | 1.43 | 2.22 | | |
| 27/2-3/3/82 | 43 | 36.33 | 1.55 | 0 | 4.61 | 3.06 | 1.56 | 1.21 | 8.98 | 57.30 |
| 4-8/ " | 44 | 39.10 | 2.20 | 0 | 5.46 | 3.28 | 1.56 | 2.76 | 8.30 | 62.66 |
| 9-13 " | 45 | 39.65 | 0.88 | 0 | 5.50 | 3.22 | 1.36 | 2.30 | 8.45 | 61.36 |
| 14-18 " | 46 | 39.65 | 0.89 | 0 | 5.50 | 3.22 | 1.36 | 2.30 | 8.45 | 61.36 |
| 19-23 " | 47 | 40.25 | 0.81 | 0 | 5.60 | 3.28 | 1.36 | 2.18 | 8.35 | 61.83 |
| 24-28 " | 48 | 43.30 | 0.60 | 0 | 6.16 | 3.56 | 1.36 | 2.14 | 7.60 | 64.72 |
| Mars 1982 | - | 39.40 | 1.27 | 0 | 5.40 | 3.25 | 1.43 | 2.05 | | |
| 29/3-3/4/82 | 49 | 41.48 | 0.30 | 0 | 5.83 | 3.47 | 1.02 | 1.93 | 9.94 | 63.97 |
| Avril 1982 | - | 43.75 | 1.18 | 0 | 6.40 | 3.50 | 1.36 | 2.48 | 9.59 | |

(4) Enfin, l'évaluation de la charge dissoute en solution dans les eaux de ruissellement peut être tentée en recherchant graphiquement la relation du type $C_r = aQ^{-1/n}$ et en l'extrapolant à nouveau dans le cas invraisemblable où toute l'eau écoulee est dans sa totalité du ruissellement. Cette tentative peut être menée au niveau de la charge totale mais aussi de chaque élément en solution. Elle n'est d'ailleurs pas très différente dans sa formulation de l'hypothèse qui consisterait à admettre qu'à l'interface sol/air les eaux de pluie ruissellent sur une surface presque chimiquement « inerte ». Autrement dit, que la minéralisation des eaux de ruissellement est au moins égale, sinon supérieure, à celle des eaux de pluie (aux trois stations amont de Bakel, Kedougou et Tambacounda, la concentration moyenne en solution dans les principales averses de 1981 a été chiffrée à 15 mg/l).

Ce qui transparaît en définitive, c'est que la compréhension du fonctionnement géodynamique des grands bassins versants tropicaux impose aux études entreprises de consacrer des efforts similaires à l'aval et à l'amont. La « respiration hydrogéochimique » des grandes rivières africaines ne peut cependant être ressentie qu'en accordant une attention particulière aux précipitations et aux tous premiers ruissellements qu'elles engendrent. L'entreprise est difficile car, sur les provinces distributrices de l'amont, les averses sont le plus souvent nocturnes et nous emprunterons à l'écrivain Mc CULLOUGH (1977) pour conclure : honteuses et confuses d'avoir ... déserté la région depuis vingt ans, les pluies du Sahel « se cachent pour mourir ».

CONCLUSION

Le bilan de l'altération chimique et l'évaluation de l'héritage dissous continental à l'embouchure du fleuve Sénégal font suite aux études menées par GAC et KANE (1986) sur l'érosion mécanique et les flux de matières solides.

Pour les apports dissous d'origine continentale, l'enseignement le plus important réside dans l'extrême réduction du temps de séjour de l'eau douce à l'embouchure du fleuve. Pendant la période des hautes-eaux de courte durée (de deux à trois mois), la charge dissoute des eaux fluviales se stabilise autour de 60 à 70 mg/l (les teneurs en chlorure et en sodium révèlent la présence d'eau de mer même en crue). L'eau salée se maintient pendant 9 à 10 mois dans le cours du fleuve : à St Louis, la salinité a dépassé 10 ‰ début décembre 81, 20 ‰ vers le 10 janvier 82, 30 ‰ à la mi-mars et celle de l'eau de mer à partir du 15 mai 1982. La salinité maximale (39 ‰), notée le 7 juillet 1982, témoigne du fonctionnement de l'estuaire du Sénégal en « estuaire inverse ». Les deux phases de désalinisation de la vallée du fleuve ont duré 27 jours en 1981 et 38 jours en 1982. L'évaluation quantitative et qualitative des flux dissous a été menée en utilisant l'artifice des mesures réalisées à l'amont du front salé.

Les flux de particules dissoutes ayant transité à l'embouchure du Sénégal se sont élevés à 500 000 tonnes en 1981/1982. Ces apports en solution, véhiculés par $11,784.10^9$ m³ d'eau, correspondent à une charge moyenne annuelle de 42,3 mg/l et à une érosion chimique spécifique de 1,85 t/km²/an. En admettant une charge dissoute moyenne comparable en 1982/1983, on évalue que pour un volume écoulé de $8,01.10^9$ m³ l'apport dissous a été de l'ordre de 340 000 tonnes.

En pourcentage pondéral, les flux dissous sont essentiellement constitués de bicarbonates (57,5 %) et de silice (18,1 %). A l'exception du calcium (8 %), les autres alcalins et alcalino-terreux sont présents dans des proportions identiques (sodium : 4,5 %, potassium : 4,3 %, magnésium : 4,1 %). Les chlorures sont relativement abondants (3,1 %) alors que les sulfates sont négligeables (0,4 %). La silice « d'origine continentale » se caractérise par des teneurs relativement constantes, alors qu'à l'interface fleuve/océan, des écarts très importants par rapport à la courbe théorique de dilution sont notés pour les concentrations de cet élément.

En moyenne sur les deux cycles étudiés, les exportations de matières à l'embouchure du Sénégal sont de l'ordre de 2 445 000 tonnes dont 81 % de particules fines en suspension, 17,5 % de substances dissoutes et 1,5 % de matière organique. Les taux d'érosion mécanique et chimique réunis représentent un soutirage de matière de l'ordre de 12,5 t/km²/an ou encore 125 kg/ha/an, valeurs modestes comparativement aux autres rivières africaines. En une année et en prenant comme base une densité moyenne de 2,25, les reliefs s'éroderaient de 6 microns environ, et il faudrait de l'ordre de 170 000 ans dans les conditions d'aridité actuelles pour provoquer un abaissement général du paysage d'une hauteur de 1 m.

Enfin, des propositions ont été formulées pour mieux identifier les causes et cerner les mécanismes qui président à l'acquisition de la charge particulaire et dissoute par les grandes rivières sahéliennes.

Manuscrit déposé le 9 juillet 1985, accepté le 24 décembre 1985

BIBLIOGRAPHIE

- ASTON S.R. (1983) — Natural water and atmospheric chemistry of silicon. *In* : « Silicon Geochemistry and Biogeochemistry », S.R. ASTON (ed.), Academic Press, London, p. 77 - 100.
- BIEN G.S., CONTOIS D.E. et THOMAS W.H. (1958) — The removal of soluble silica from fresh water entering the sea. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 14, p. 35 - 54.
- COCHE A.G. et BALON E.K. (1974) — Lake Kariba, a man-made tropical ecosystem in central Africa. *Ecolog. Monographs*, Ed. Junk, 767 p.
- GAC J.Y. (1979) — Géochimie du bassin du lac Tchad. Bilan de l'altération, de l'érosion et de la sédimentation. Thèse Sci., Univ. Strasbourg et *Trav. et Doc. ORSTOM*, (1980), 123, 251 p.
- GAC J.Y. (1985) — Le phénomène des brumes sèches au Sénégal en 1984-1985. *Bull. Veille Climatique Satellitaire*, Ed. ORSTOM et Centre Météorologie Spatiale, Lannion, p. 31 - 35.
- GAC J.Y. et KANE A. (1986) — Le fleuve Sénégal. I. Bilan hydrologique et flux continentaux de matières particulaires à l'embouchure. *Sci. Géol., Bull.*, Strasbourg, 39, 1, p. 99 - 130.
- GAC J.Y., KANE A., SAOS J.L., CARN M. et VILLENEUVE J.E. (1985) — L'invasion marine dans la basse vallée du Sénégal. *Rev. ORSTOM, Hydrobio. tropicale*, sous presse.
- GAC J.Y., MONTEILLET J. et FAURE H. (1983) — Marine shorelines in estuaries as paleoprecipitation indicators. *In* : « Variations in the global water budget », A. STREET-PERROT *et al.* (ed.), Reidel Publ. Cie, p. 361 - 370.
- GAC J.Y. et PINTA M. (1972) — Bilan de l'érosion et de l'altération en climat tropical humide. Estimation de la vitesse d'approfondissement des profils. Etude du bassin de l'Ouham (RCA). *Cah. ORSTOM, Sér. Géol.*, V, 1, p. 83 - 96.
- GAC J.Y. et TRAVI Y. (1984) — Etude quantitative et qualitative des poussières atmosphériques en provenance du Sahara, entre Dakar et Nouakchott. *10e Réun. ann. Sci. Terre*, Bordeaux, p. 237.
- GARRELS R.M. et MACKENZIE F.T. (1971) — Evolution of sedimentary rocks. Ed. W.W. Norton, New York, 397 p.
- GIBBS R.J. (1972) — Water chemistry of the Amazon river. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 36, p. 1061 - 1066.
- GOLDBERG E.D. (1957) — Biogeochemistry of trace metals. *In* : « Treatise on marine ecology and paleoecology », 1, J.W. HEDGEPEETH (ed.), *Geol. Soc. Amer. Mem.*, 67, p. 345 - 357.
- HURST H.E. (1957) — The Nile. Ed. Constable, London, 331 p.
- IMEVBORE A.M.A. (1970) — The chemistry of the river Niger in the Kainji reservoir area. *Arch. Hydrobiol.*, 67, 3, p. 412 - 431.
- LISS P.S. et POINTON M.J. (1973) — Removal of dissolved boron and silicon during estuarine mixing of sea and rivers waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, p. 1493.
- LÔ H.M. (1984) — Le bassin de la Gambie en amont de Goulombou ; contribution à l'hydrologie et à la dynamique fluviales en domaine tropical humide africain (République de Guinée et du Sénégal). Thèse 3e cycle, Univ. Nancy II, 396 p.
- Mac CULLOUGH C. (1977) — The thorn birds. Ed. Harpers and Row, New York, 536 p.
- MEYBECK M. (1978) — Note on dissolved elemental contents of the Zaire river. *Neth. J. Sea Res.*, 12, p. 293 - 295.
- MEYBECK M. (1984) — Les fleuves et le cycle géochimique des éléments. Thèse Sci., Univ. Paris VI, 457 p.
- MILLOT G. (1964) — Géologie des argiles. Ed. Masson et Cie, Paris, 499 p.
- MONNET C. (1972) — Contribution à l'étude de la dynamique et de la nature des suspensions d'un fleuve intertropical, le Bandama, Côte d'Ivoire. Evolution des éléments chimiques des eaux de son estuaire. Thèse Sci., Univ. Nice, 427 p.
- SAOS J.L., KANE A., CARN M. et GAC J.Y. (1984) — Persistance de la sécheresse au Sahel : invasion marine exceptionnelle dans la vallée du fleuve Sénégal. *10e Réun. ann. Sci. Terre*, Bordeaux, p. 499.
- SCHINK D.R. (1967) — Budget for dissolved silica in the Mediterranean sea. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 31, 6, p. 987 - 999.
- ŞHANIN M. (1985) — Hydrology of the Nile basin. Ed. Elsevier, Amsterdam, 575 p.
- SHOLKOVITZ E.R. (1976) — Flocculation of dissolved organic matter during the mixing of river water and sea water. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 40, p. 831 - 846.

- SPENCER C.P. (1983) — Marine biogeochemistry of silicon. *In* : « Silicon Geochemistry and Biogeochemistry », S.R. ASTON (ed.), Academic Press, London, p. 100 - 141.
- WOLLAST R. et MACKENZIE F.T. (1983) — The global cycle of silica. *In* : « Silicon Geochemistry and Biogeochemistry », S.R. ASTON (ed.), Academic Press, London, p. 39 - 76.