# Reconnaissance géochimique des eaux du Fouta Djalon (Guinée) Flux de matières dissoutes et en suspension en Haute-Gambie

Didier ORANGE [1], Jean-Yves GAC [2]

***Résumé :*** *Les eaux du Fouta Djalon sont bicarbonatées calci-magnésiennes et faiblement minéralisées (33 mg/l), les bicarbonates assurant à eux seuls l'équilibre anions-cations et la silice constituant 33 % de la charge dissoute totale. Ces eaux traduisent une dynamique générale d'altération de type monosiallitique. Dans le détail, les bassins de la Gambie et de la Falémé, au nord du Fouta Djalon, sont à caractère bauxitique marqué alors que les bassins côtiers de la Tominé et du Konkouré sont dominés par la bisiallitisation ; ailleurs règne la monosiallitisation. Une campagne de prélèvements durant l'hivernage 1986/87 sur le fleuve Gambie au bief de Kédougou a permis une estimation qualitative et quantitative des flux de matières dissoutes et en suspension provenant du versant nord du Fouta Djalon. La caractéristique essentielle de ces flux de matières est la faible importance du transport solide (22 mg/l). Il en résulte un fort taux de COP (5,1 % des MES) et une érosion mécanique spécifique (4,3 t/km²/an) largement inférieure aux moyennes des autres fleuves africains. Toutes formes d'exportation confondues, le flux relatif des éléments majeurs est le suivant : Si > Ca > Mg > Na > K > Al > Fe. La fraction dissoute représente 65 % des exportations, la fraction minérale en suspension 33,2 % et le carbone organique particulaire 1,8 %. L'altération chimique spécifique est estimée à 3,7 t/km²/an, taux du même ordre de grandeur que celui enregistré sur le Niger mais inférieur à ceux des fleuves des autres régions africaines.*

**Mots-clés :** Bilan géochimique - Bassin versant - Flux dissous - Flux en suspension - Gambie - Fouta Djalon - Kédougou.

***Abstract :*** **Geochemistry of waters from Fouta Djalon (Guinea). Dissolved and suspended matter fluxes in the Upper Gambia River region.** *The total dissolved load of Fouta Djalon waters is low (33 mg/l). $HCO_3^-$ is the main anion, $Cl^-$ being almost non-existant. Major cations are $Ca^{2+}$ and $Mg^{2+}$. $SiO_2$ accounts for up to 33 % of the total dissolved load. Generally, such waters are due to monosiallitic weathering. In detail, the Gambia and Falémé watersheds exhibit a bauxitic trend, whereas to the west the Tominé and Konkouré watersheds are dominated by bisiallitic trends, with monosiallitic trends dominating elsewhere. Samples of dissolved and suspended matters from the Gambia River have been collected at Kédougou during the 1986/87 discharge. The main characteristic of these fluxes is the relatively low proportion of suspended particulate matter (22 mg/l). In constrat, the rate of particulate organic carbon in suspended sediments is important (5.1 %). The specific mechanical erosion (4.3 t/km²/yr) is less than that estimated for other African rivers. In terms of total mass, the relative flux of major elements is given by Si > Ca > Mg > Na > K > Al > Fe, 65 % representing dissolved matter, 33.2 % suspended matter and 1.8 % particulate organic carbon. The specific chemical weathering is estimated at 3.7 t/km²/yr, similar to the value for the Niger watershed but smaller than those for other African rivers.*

**Key words :** Geochemical balance — Watershed — Flux of dissolved matter — Flux of suspended matter - Gambia River - Fouta Djalon - Kédougou.

(1) *Centre de Géochimie de la Surface, CNRS, Strasbourg, France.*
(2) *Laboratoire de Géologie, ORSTOM, Dakar, Sénégal.*

## INTRODUCTION

Le bassin amont de la Gambie ne représente qu'une petite entité géographique d'Afrique occidentale. Il constitue cependant un lieu privilégié pour l'étude des processus concurrentiels d'érosion mécanique et d'altération chimique d'un vieux paysage latéritique : le Fouta Djalon. Ce vieux massif africain, partie septentriale de la dorsale guinéenne, est aujourd'hui entièrement cuirassé. Les grands traits de l'évolution actuelle du milieu ont été décrits par LO (1984) dans le secteur aval de la partie continentale du bassin de la Gambie. Ses travaux ont montré la difficulté d'y quantifier les flux de matières dissoutes et en suspension, et fait ressortir la nécessité de remonter toujours plus à l'amont des fleuves. La présente note synthétise, à la suite des études de BAMBA (1987) et de GAC *et al.* (1987a), les résultats de missions ponctuelles de prélèvements d'eaux de surface qui drainent le massif du Fouta Djalon en Guinée et d'une saison de mesures des éléments dissous et des matières en suspension de la Gambie à Kédougou (Sénégal oriental). Elle complète les travaux de LERIQUE (1975), LESAK *et al.* (1984), LO (1984) et MEYBECK *et al.* (1985) effectués à la station de Gouloumbou, exutoire du bassin continental situé à 400 km en aval de Kédougou.

Après une présentation des caractéristiques physiques du bassin versant amont de la Gambie, de son hydrologie et des méthodes de prélèvement, la géochimie des eaux de surface du Fouta Djalon est décrite. Les récentes campagnes de prélèvements des eaux de sources, de ruisseaux, de rivières et de fleuves foutaniens ont permis de préciser, pour la première fois, le déterminisme qui règle de l'amont vers l'aval la succession ordonnée et systématique des différents types de sols, et qui concourt au caractère monosiallitique dominant des altérations. En dernier lieu, le bilan des flux de matières s'appuie sur les mesures réalisées à Kédougou au cours du cycle 1986/1987 et sur les observations antérieures réalisées au site aval de Gouloumbou. Il en découle une première quantification des processus concurrentiels de l'altération chimique et de l'érosion mécanique.

## CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DU BASSIN VERSANT AMONT DE LA GAMBIE

Depuis les hauteurs du Fouta Djalon à 1 150 m d'altitude jusqu'à Kédougou, 1 000 mètres plus bas, la Gambie draine sur une superficie de 7 500 km$^2$, selon un axe SE-NW, les contreforts septentrionaux de la dorsale guinéenne, seul relief d'Afrique occidentale. Les surfaces d'aplanissement constituent un des traits majeurs du paysage. Elles sont couvertes d'un épais manteau latéritique, entaillées de gorges profondes et disposées en gradins successifs se terminant le plus souvent par d'imposants escarpements. La vallée alluviale, cuirassée par endroits, représente le reste du bassin, soit 48 % de la superficie totale ; elle s'étend en pente douce sous forme de glacis de 500 à 120 m d'altitude (Fig. 1).

Le bassin amont de la Gambie se situe au SE de la chaîne panafricaine des Bassarides mise en place entre 1 000 et 650 millions d'années (VILLENEUVE, 1984). La couverture sédimentaire infracambrienne de *Madina Kouta* constituée essentiellement de grès très durs, plus ou moins quartzitiques, est la principale formation géologique (Fig. 2). Au nord, elle est bordée par le socle birrimien de la *boutonnière de Kéniéba* représenté à cet endroit par des séries faiblement métarmorphisées de schistes et grauwackes. Enfin, elle est masquée à l'ouest par des dépôts discordants molassiques argilo-gréseux du Cambrien inférieur (*groupe de Mali*). Du Lias au Trias, d'importantes venues doléritiques ont traversé toutes ces formations géologiques et ont armé toute la charpente gréseuse antérieure : grès et dolérites forment aujourd'hui l'ossature des principaux reliefs (BASSOT, 1966 ; TORCHINE, 1976 ; VILLENEUVE, 1984).

Sur cette charpente gréseuse et doléritique, à la faveur d'un climat contrasté, se développent principalement des sols squelettiques et ferrallitiques. La pédogénèse y est *gouvernée* par la topographie (MAIGNIEN, 1958 ; BARRETO, 1963 ; CHAUVEL, 1967). La couverture pédologique est essentiellement kaolinique et à sesquioxydes de fer. Cependant, quelques hauts secteurs sont à accumulation bauxitique et de rares dépressions sont à tendance vertique. La végétation se distribue en grandes zones à l'intérieur desquelles des changements d'importance locale peuvent apparaître par suite de facteurs secondaires (édaphiques, anthropiques,...). Du sud au nord, la forêt dégradée guinéenne s'éclaircit et passe progressivement à la savane, arborée puis arbustive. Les hauteurs du Fouta Djalon ont été fortement sollicitées par l'extension des zones de culture. Ainsi, malgré une faible densité de population sur l'ensemble du bassin versant, le facteur anthropique a eu une importance considérable sur la dégradation de la végétation et, par voie de conséquence, sur la morphogénèse.

L'irrégularité de la répartition annuelle et mensuelle des précipitations et l'hétérogénéité de leur répartition spatiale constituent les caractéristiques essentielles du climat qui règne dans cette zone tropicale : le régime des précipitations y est caractérisé par l'alternance d'une saison sèche et d'une saison pluvieuse. Suivant la pluviométrie, on distingue au sud le domaine guinéen où les précipitations sont supérieures à 1 500 mm/an et où la saison sèche est tempérée par les brouillards descendants de la montagne et, au nord, le domaine soudanien avec une pluviométrie de 1 200 mm/an. L'effet d'altitude entre les hauts plateaux du sud et les bas glacis du nord accentue l'opposition climatique entre ces deux domaines. De Labé à Kédougou, de 1 025 m à 120 m d'altitude, sur

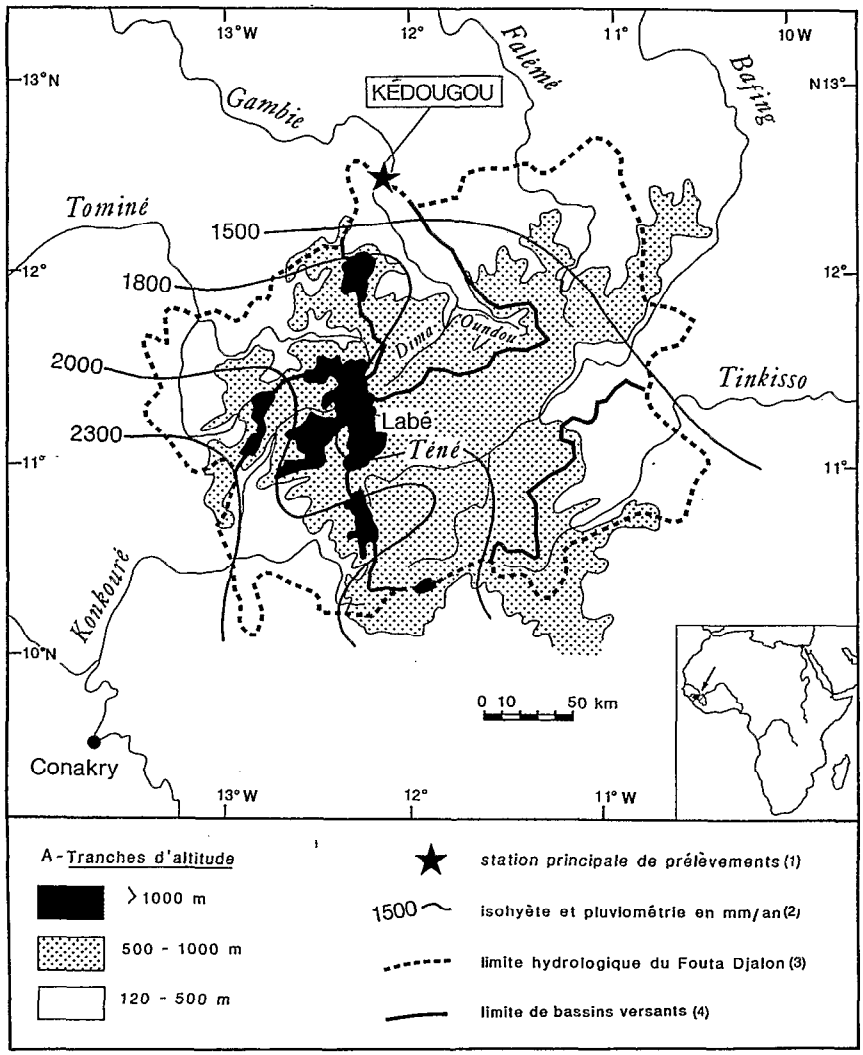


Fig. 1. — Carte hypsométrique et limites hydrologiques du Fouta Djalon.

*Hypsometric map and hydrological boundaries of the Fouta Djalon Massif.*
*(1) principal collecting sites ; (2) isohyetes and rainfall in mm/year ; (3) hydrological border of the Fouta. Djalon ; (4) Divide of the watersheds. A. Altitudes.*

une période d'étude de plus de cinquante ans, la température moyenne annuelle augmente du sud au nord, de 23 °C à 28 °C et l'ETP de 1 400 à 1 900 mm/an alors que la pluviosité moyenne diminue de 1 700 à 1 300 mm/an (ROCHETTE, 1974 ; DESCROIX, 1986 ; GAC *et al.*, 1987a). Ainsi, le déficit hydrique n'existe que dans la partie située au nord du 12e parallèle, c'est-à-dire en domaine soudanien (Fig. 1).

Les conditions physiques, géomorphologiques, lithologiques, pédologiques et climatiques prédisposent la surface du bassin à un ruissellement important et, en corollaire, à une évacuation rapide des lames d'eau précipitées. Les seuls facteurs défavorables à l'écoulement sont la végétation et, dans le nord du bassin, les processus d'évapotranspiration.

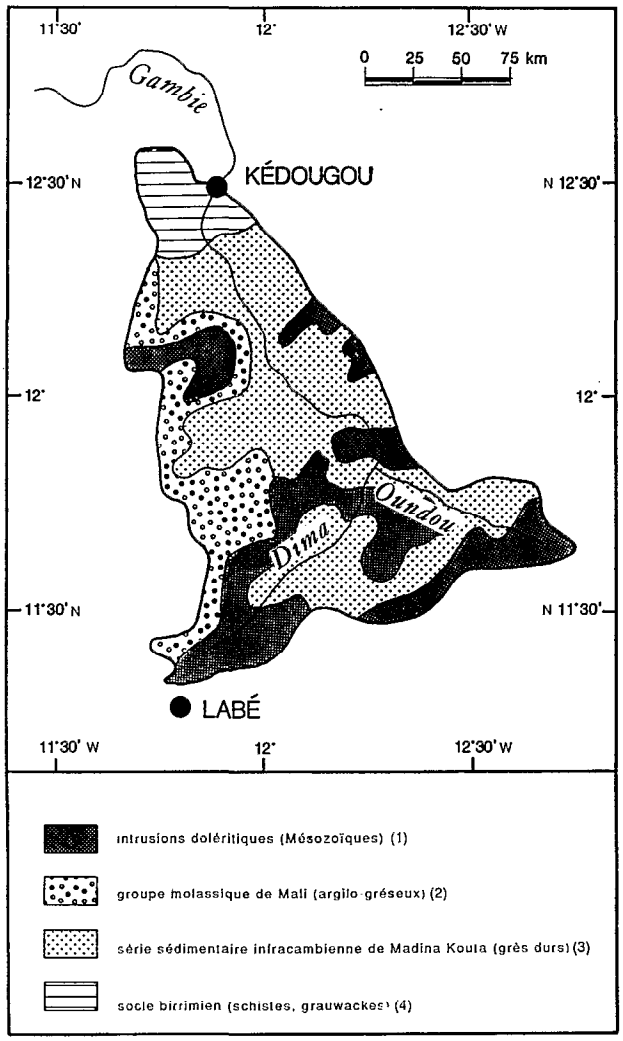


Fig. 2. — Géologie du bassin amont de la Gambie.

*Geological sketch map of the Upper Basin of the Gambia River. (1) Mesozoic doleritic intrusions ; (2) Lower cambrian molassic sediments of the Mali group (Shales and sandstone). (3) Infracambrian sediments of Madina Kouta Serie ; (4) Birrimian Bedrock.*

## HYDROLOGIE DE LA GAMBIE

Ces conditions naturelles expliquent un réseau hydrographique à chevelu dense sur l'ensemble du bassin, et permanent uniquement dans la partie montagneuse où le régime de tous les cours d'eau est torrentiel. Le profil en long de la Gambie est bien hiérarchisé. Dans son cours supérieur, elle a une pente moyenne importante de 1,2 % : elle dévale alors les plateaux cuirassés en une série de chutes. C'est seulement à 100 km de Kédougou qu'elle acquiert une pente faible de 0,05 %. Sur l'ensemble de son parcours, la pente moyenne de la Gambie est de 0,4 %. L'irrégularité des écoulements est de règle. Perceptible à toutes les échelles de temps (annuelle, mensuelle et journalière), elle est la résultante de l'irrégularité des précipitations et d'un réseau hydrographique dense et à forte pente incapable de filtrer et de linéariser les entrées.

La répartition mensuelle des écoulements est caractéristique d'un régime tropical de transition. La saison des hautes eaux dure de quatre à cinq mois avec un maximum qui se situe généralement en septembre. Les basses eaux s'étendent de novembre à juin avec des étiages absolus en mai. Quelle que soit l'importance de la crue, les débits deviennent inférieurs à 20 $m^3/s$ dès le début janvier et jusqu'à l'arrivée de l'onde de crue suivante. Sur une chronique datant du milieu du siècle, l'écoulement moyen annuel de la Gambie à Kédougou est estimé à 104 $m^3/s$ (CHAPERON et GUIGUEN, 1974 ; OLIVRY, 1983 ; DACOSTA, 1985). Au cours de la période récente (1970-1987), le module annuel a été de 72 $m^3/s$ ; le déficit moyen de cette période est de près de 30 % et souligne la sévérité exceptionnelle de la sécheresse actuelle qui règne dans cette zone tropicale (GAC et FAURE, 1987b).

## MÉTHODE D'ÉTUDE

### Étude des matières dissoutes

Les campagnes de prélèvements ont été réalisées essentiellement en saison sèche, en 1986, avant et après la saison des pluies. En dépit des difficultés d'accès, le lot d'échantillons a été diversifié aux sources, aux ruisseaux, aux rivières et aux fleuves. Si, en grande partie, l'échantillonnage a été effectué dans le bassin de la Gambie, quelques prélèvements proviennent aussi du haut bassin de la Falémé, du haut bassin du Bafing (branche mère du fleuve Sénégal) et des bassins côtiers guinéens (Tominé et Konkouré) dont les secteurs amont forment les flancs occidentaux du Fouta Djalon (Fig. 1). Au total, 85 échantillons ont été collectés. Parallèlement, les eaux de la Gambie à Kédougou ont été échantillonnées quotidiennement du 27/07 au 1/10/86 au niveau de la partie centrale de la section du fleuve, à l'endroit où s'observent les courants les plus forts.

Après filtration à 0,45 µm, les déterminations de la composition chimique ont porté sur les éléments majeurs qui représentent près de 99 % de la matière minérale en solution. Le sulfate n'a pas pu être dosé (concentration inférieure à la limite de détection : 40 µeq/l) et la matière organique dissoute n'a pas été étudiée.

## Étude des matières en suspension

Les variations de la charge solide des eaux de la Gambie à Kédougou ont été suivies quotidiennement du 12/06 au 30/09/86. En fonction de la position du plan d'eau, les échantillons ont été collectés à différentes profondeurs sur cinq ou sept profils transversaux.

Les déterminations des compositions minéralogiques, les analyses chimiques et le dosage de la matière organique des matières en suspension ont été faites sur des regroupements d'échantillons hebdomadaires au Laboratoire de géologie de l'ORSTOM à Dakar pour la diffractométrie aux rayons X et au Centre de géochimie de la surface du CNRS à Strasbourg pour la chimie ; la matière organique a été dosée par la méthode de Anne. Les déterminations granulométriques n'ont pu être réalisées par suite des trop faibles quantités de matières prélevées.

## RECONNAISSANCE GÉOCHIMIQUE DES EAUX DE SURFACE DU FOUTA DJALON

Les réseaux hydrographiques de la partie nord et de la partie ouest du Fouta Djalon ont été différenciés (Fig. 1). Le réseau septentrional regroupe le bassin versant amont du Sénégal (constitué de la Falémé, du Bafing et de la Téné) et celui de la Gambie (formé par la Dima à l'ouest et l'Oundou à l'est) ; sous l'intitulé « autres » (Tabl. I) sont regroupés cinq prélèvements situés à l'aval de la confluence de ces deux rivières. Le réseau occidental est plus restreint ; il est représenté par la Tominé au nord et le Konkouré au sud.

Tableau I

Composition chimique moyenne des eaux drainant le massif du Fouta Djalon

*Average chemical composition of waters from the Fouta Djalon Massif*

| Bassin versant | n | Anions Cl (µeq/l) | Anions $HCO_3$ (µeq/l) | Cations Ca (µeq/l) | Cations Mg (µeq/l) | Cations K (µeq/l) | Cations Na (µeq/l) | $SiO_2$ (mg/l) | pH | Cond (µS/cm) | Σanion (µeq/l) | Σcation (µeq/l) | TDS (mg/l) | $R_E$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| NORD FOUTA | 60 | 17 | 307 | 144 | 112 | 17 | 50 | 13,0 | 6,9 | 33 | 324 | 323 | 38,5 | 1,2 |
| $H^t$-SENEGAL | 22 | 19 | 328 | 152 | 125 | 18 | 56 | 12,7 | 6,9 | 34 | 347 | 351 | 40,0 | 1,4 |
| Falémé | 3 | 10 | 590 | 315 | 211 | 20 | 52 | 23,2 | 7,3 | 61 | 600 | 598 | 70,4 | 0,7 |
| Bafing | 7 | 22 | 228 | 83 | 85 | 19 | 69 | 7,7 | 6,7 | 23 | 250 | 256 | 27,4 | 2,6 |
| Téné | 12 | 26 | 166 | 58 | 78 | 17 | 46 | 7,2 | 6,7 | 19 | 192 | 199 | 22,1 | 2,1 |
| GAMBIE | 38 | 16 | 286 | 136 | 98 | 15 | 43 | 13,4 | 6,9 | 31 | 302 | 292 | 37,0 | 0,9 |
| Dima | 24 | 24 | 240 | 99 | 92 | 17 | 42 | 11,9 | 6,7 | 26 | 264 | 250 | 32,1 | 1,0 |
| Oundou | 9 | 3 | 368 | 201 | 105 | 11 | 47 | 16,7 | 7,2 | 38 | 371 | 364 | 46,1 | 0,8 |
| Autres | 5 | 16 | 277 | 131 | 102 | 15 | 42 | 12,2 | 6,8 | 30 | 293 | 290 | 35,1 | 1,1 |
| OUEST FOUTA | 25 | 21 | 249 | 91 | 98 | 18 | 56 | 7,9 | 6,8 | 26 | 270 | 263 | 28,6 | 2,2 |
| Tominé | 18 | 16 | 311 | 114 | 130 | 17 | 57 | 8,4 | 7,0 | 30 | 327 | 318 | 33,6 | 2,1 |
| Konkouré | 7 | 30 | 134 | 48 | 39 | 19 | 55 | 6,9 | 6,4 | 17 | 164 | 161 | 19,5 | 2,5 |
| EAUX DU FOUTA | 85 | 19 | 259 | 110 | 98 | 18 | 49 | 10,9 | 6,8 | 28 | 278 | 275 | 32,6 | 1,5 |

n : nombre d'échantillons analysés ; Cond : conductivité à 20°C ; TDS : concentration en éléments dissous ;
$R_E=2*[3K+3Na+Ca-(SiO_2/60,1)*1000]/[K+Na+Ca]$

## Caractéristiques des eaux de surface du Fouta Djalon

La caractéristique essentielle des eaux qui drainent le massif du Fouta Djalon est leur très faible minéralisation. A l'exception des trois échantillons du bassin amont de la Falémé, la minéralisation des eaux est inférieure à 40 mg/l (Tabl. I). Le regroupement de tous les prélèvements donne pour les eaux du Fouta Djalon une concentration moyenne en solution de 33 mg/l. Dans l'ensemble, ces eaux sont très proches de la neutralité avec un pH moyen de 6,8. Le caractère acide est plus prononcé au niveau des sources (6,6) que des ruisseaux (6,8), des rivières (6,9) et des fleuves (7,1). Autrement dit, plus le temps de parcours des eaux météoriques est long ou, encore, plus leur cheminement se fait sur de grandes distances, et plus leur acidité diminue.

Les eaux du Fouta Djalon sont bicarbonatées calcimagnésiennes, à l'exception du bassin de la Konkouré où les faibles concentrations en calcium et magnésium sont remarquables. La comparaison des moyennes établies par bassin versant montre que les teneurs en sodium et potassium sont relativement stables d'un bassin à l'autre (Tabl. I). Ce sont les teneurs en bicarbonates, calcium et magnésium qui sont les plus variables, la silice est également très fluctuante d'un bassin à l'autre.

Le classement des eaux en fonction de l'importance du bassin drainé (Tabl. II) fournit une sorte de *profil en long* chimique et met en évidence la faible variabilité de la charge dissoute totale depuis les sources jusqu'aux fleuves en passant par les ruisseaux et les rivières (de 31 à 34 mg/l). Ce résultat n'est pas sans liaison avec la nature essentiellement gréseuse du substratum et l'importance des niveaux cuirassés *stériles*. La progression des eaux entre l'amont et l'aval des fleuves se traduit également par une diminution des teneurs en silice et une augmentation des concentrations en bicarbonate et en magnésium.

En résumé, les hauteurs du Fouta Djalon livrent actuellement aux provinces de l'aval des eaux proches de la neutralité, faiblement minéralisées où prédominent le bicarbonate, le calcium et le magnésium.

Tableau II

Composition chimique moyenne (en µeq/l) des eaux de sources, de ruisseaux, de rivières et de fleuves du Fouta Djalon

*Average chemical composition (µeg/l) of waters from springs, brooks, rivers and large rivers originating from the Fouta Djalon Massif*

| Taille du bassin | Sources | Ruisseaux | Rivières | Fleuves |
|---|---|---|---|---|
| n | 23 | 32 | 14 | 16 |
| pH | 6,6±0,1 | 6,8±0,1 | 6,9±0,1 | 7,1±0,1 |
| Cond (µS) | 28±3 | 27±3 | 25±3 | 31±3 |
| $HCO_3^-$ | 256±35 | 253±38 | 250±44 | 281±40 |
| $Cl^-$ | 22±3 | 18±2 | 19±5 | 18±3 |
| $Ca^{2+}$ | 110±23 | 111±21 | 111±20 | 111±12 |
| $Mg^{2+}$ | 90±13 | 94±14 | 104±24 | 119±26 |
| $K^+$ | 21±3 | 15±1 | 15±2 | 19±2 |
| $Na^+$ | 54±4 | 51±5 | 38±3 | 52±7 |
| Σanions | 278 | 271 | 269 | 299 |
| Σcations | 275 | 271 | 268 | 301 |
| $SiO_2$ (mg/l) | 12,4±1,4 | 10,5±1,1 | 10,4±1,0 | 9,7±1,3 |
| TDS (mg/l) | 34,1±3,9 | 31,7±3,9 | 31,2±3,8 | 33,0±3,9 |

n : nombre d'échantillons analysés ; Cond : conductivité à 20°C ; TDS : concentration en éléments dissous

## La qualité chimique des eaux par bassin versant

Les eaux du Bafing et de son affluent principal, la Téné, ont des caractéristiques physico-chimiques assez semblables : pH analogues (6,7) et charges dissoutes totales du même ordre de grandeur (27 et 22 mg/l). L'anion dominant est le bicarbonate et ses fortes teneurs sont associées à celles du magnésium. Les eaux de la Falémé se singularisent par leurs fortes teneurs en bicarbonate, en calcium, en silice et leurs pH légèrement basiques (7,3). Ce résultat ne s'appuie que sur trois analyses et demande à être confirmé.

Pour la Gambie, le réseau occidental représenté par la Dima et le réseau oriental formé par l'Oundou ont des eaux de qualité chimique différente. A l'ouest, les eaux sont légèrement acides (pH moyen de 6,7), faiblement minéralisées (32,1 mg/l) avec de faibles concentrations en calcium. A l'est, les eaux ont des pH variables allant de 6,7 à 7,8 (pH moyen de 7,2) et sont plus minéralisées (46,1 mg/l) ; cette différence est imputable à la présence largement dominante de l'ion calcium dans cette partie du bassin amont de la Gambie. D'autre part, le chlore est pratiquement inexistant alors qu'il est bien représenté sur le bassin de la Dima.

Les différences essentielles entre les eaux des deux bassins versants côtiers se situent au niveau du pH, de la charge dissoute totale, des teneurs en bicarbonate, calcium et magnésium. Au sud, les eaux de la Konkouré sont acides (pH=6,4) et très faiblement minéralisées ; le cation dominant est le sodium mais sa concentration est tout de même inférieure à celle enregistrée sur les eaux de la Tominé qui sont plus fortement chargées en bicarbonate, magnésium et calcium.

En résumé, il se dégage deux types chimiques d'eau correspondant à deux secteurs géographiques distincts. La Falémé et l'Oundou, qui drainent la partie NE du Fouta Djalon, ont les eaux les plus minéralisées : elles sont fortement calciques. Partout ailleurs, les eaux ont une charge dissoute totale inférieure à 35 mg/l ; elles se caractérisent par une nette déficience en calcium et bicarbonate, d'où il résulte une prédominance marquée de l'ion magnésium, les autres espèces ioniques restant à teneurs égales à l'exception du chlore dont les concentrations sont alors plus importantes.

## Caractérisation des grands types d'altération

Pour caractériser le type d'altération régnant sur les différents bassins versants constituant le Fouta Djalon, le rapport moléculaire $SiO_2/Al_2O_3$ (rapport $R_E$) de l'ensemble des minéraux secondaires présents dans les sols (ou résidu d'altération) est calculé à partir de la quantité de cations basiques et de silice contenus dans les eaux de lessivage (TARDY, 1969). La valeur du rapport $R_E$ permet de préciser le type d'altération dominant. La méthode ne fournit que des indications de tendance de l'évolution des sols d'altération. En effet, il ne s'agit que d'une simple reconstitution de l'évolution géochimique des sols à partir de collectes d'eaux de surface supposées être le reflet fidèle des eaux de nappe.

Pour l'ensemble du Fouta Djalon, la valeur du rapport $R_E$ (1,5) indique une tendance à l'allitisation et à la monosiallitisation : la gibbsite et la kaolinite sont des minéraux dominants dans les sols. Cependant, l'évolution est différente suivant les sous-bassins régionaux (Tabl. I). Les eaux de la Falémé et de la Gambie avec des valeurs respectives du rapport $R_E$ de 0,7 et 0,9 témoignent d'une altération à caractère allitique

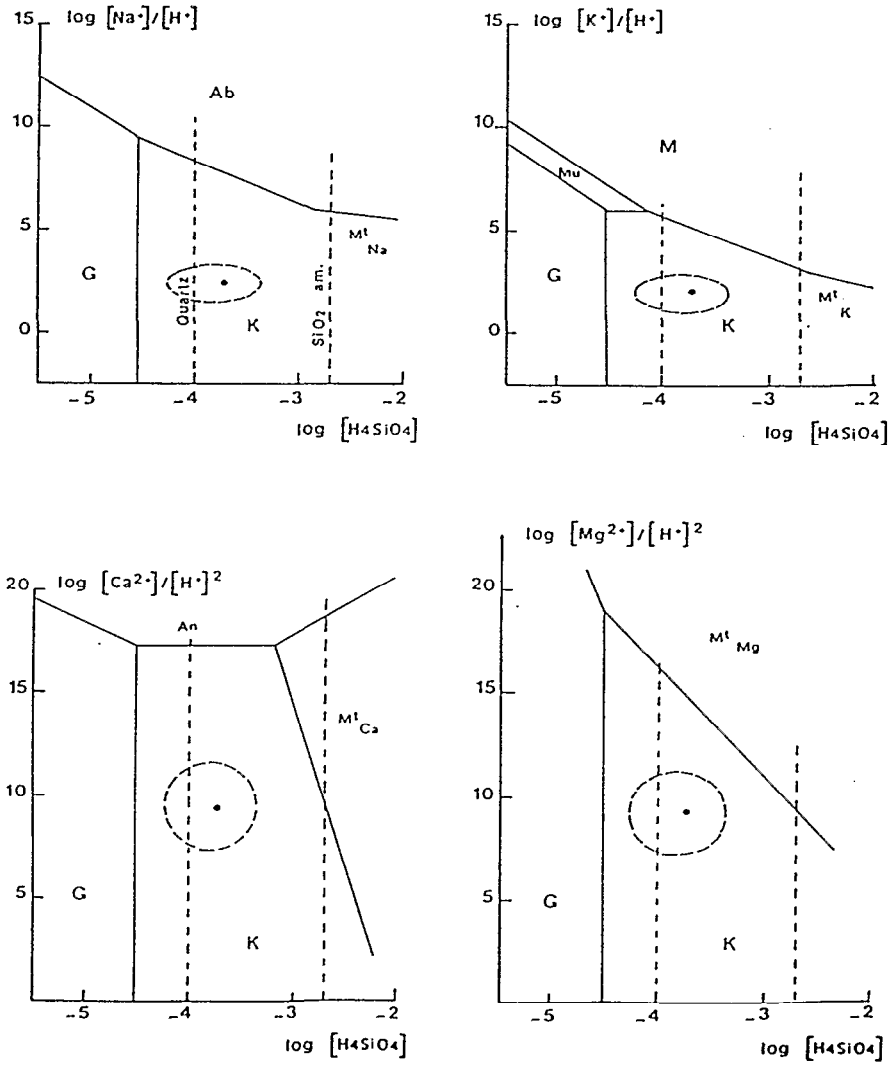


Fig. 3. — Position des eaux du Fouta Djalon dans les diagrammes de stabilité des minéraux.
Ab = albite ; An = anorthite ; G = gibbsite ; K = kaolinite ; M = microcline ; Mt (Na/K/Ca/Mg) = montmorillonite ; Mu = muscovite

*Position of Fouta Djalon waters in mineral stability diagrams.*

dominant et monosiallitique ménagé. En revanche, pour le Bafing ($R_E$=2,3) et les deux bassins côtiers, la Tominé ($R_E$=2,1) et le Konkouré ($R_E$=2,6), les eaux indiquent une monosiallitisation avancée avec une légère tendance vers la bisiallitisation, ce qui se traduit dans les sols par une prédominance de la kaolinite en présence localement de montmorillonite.

Dans le détail, des tendances régionales apparaissent. Dans les régions drainées par l'Oundou, la bauxitisation des profils est de règle, la gibbsite est le minéral dominant dans tous les sols, avec en certains endroits des valeurs négatives de $R_E$ (−1,3). Les zones drainées par la Dima présentent une plus grande diversité d'évolution : l'allitisation est le type d'altération prédominant mais certains cours d'eau témoignent d'une accumulation de la kaolinite, voire localement d'une tendance à la bisiallitisation. Trois échantillons d'eau proviennent du haut bassin de la Falémé, se situant à la bordure NE du bassin de la Gambie ; les valeurs de $R_E$ y sont inférieures à 1 : la gibbsite et l'association gibbsite/kaolinite dominent dans les sols. Pour le bassin du Sénégal, la tendance à la monosiallitisation est très marquée, la kaolinite est partout le minéral secondaire dominant dans les sols ; les plus fortes valeurs se rencontrent près des sources du Bafing et de la Téné, à l'exutoire de zones déprimées, ce qui peut paraître assez singulier. Ces bas-fonds, hauts dans la topographie, constituent en fait de véritables petits environnements confinés où la bisiallitisation peut se généraliser. Enfin, sur le flanc ouest du Fouta Djalon, le caractère bisiallitique de l'altération est très prononcé sur les deux bassins côtiers avec des valeurs de $R_E$ fréquemment supérieures à 2 ; la montmorillonite et l'association montmorillonite/kaolinite sont dominantes dans les sols.

## Les diagrammes d'équilibre et les modèles thermodynamiques

Le bilan de l'altération peut également être précisé par une approche thermodynamique qui repose essentiellement sur l'hypothèse que les eaux qui transitent dans les profils sont en équilibre provisoire et différé avec les minéraux qui s'y trouvent. Dans le cas des eaux de surface, les témoignages de ces équilibres passés entre solutions et silicates se sont dissipés mais on admet en première approximation qu'elles en sont encore le reflet pas trop lointain. Le modèle thermodynamique utilisé est celui décrit par FRITZ (1975). Les différents diagrammes d'équilibre sont bâtis à partir des constantes d'équilibre (à 25 °C et 1 atm) et des réactions d'hydrolyses utilisées par GAC (1980). Les eaux moyennes du Fouta Djalon se situent dans le domaine de stabilité de la kaolinite (Fig. 3). Elles sont sursaturées par rapport au quartz et sous-saturées par rapport à la silice amorphe. Ce caractère est mis en évidence par le tracé du cercle de confiance établi à l'aide du test de Student pour un intervalle de confiance de 95 %.

# LES EAUX DE LA GAMBIE A KEDOUGOU

La détermination des flux de matières qui transitent à l'exutoire d'un bassin versant nécessite, au préalable, d'avoir une connaissance précise du bilan de l'eau. Aussi, dans un premier temps, les conditions particulières du cycle hydrologique 1986/87 sont replacées dans le contexte des observations faites depuis 1970. Les basses eaux du cycle hydrologique 1985/86 ont été caractérisées par une interruption totale des écoulements de la Gambie entre le 12 avril et le 28 mai 1986. L'assèchement du lit mineur s'est achevé en juin avec l'apport des premières averses de la nouvelle saison des pluies. Les débits sont cependant restés très modestes jusqu'à l'amorce de l'onde de crue dans les premiers jours de juillet. L'hydrogramme de crue présente son aspect habituel en dents-de-scie avec de nombreuses intumescences jusqu'en octobre (Fig. 5). La cote maximale a été observée le 4 septembre avec 4,13 m à l'échelle limnimétrique : le cycle hydrologique 1986/87 se situe au troisième rang des plus faibles pointes de crue enregistrées depuis 1970. Après la mi-octobre, les phases de tarissement et d'épuisement se relaient pour aboutir de nouveau à l'assèchement du lit mineur le 2 avril 1987.

En relation avec les faibles précipitations tombées sur le bassin versant (1 364 mm à Labé et 1 148 mm à Kédougou, soit respectivement 18 % et 10 % de déficit), la crue 1986/87 a été l'une des plus faibles que la Gambie ait connue. Le module du cycle 1986/87 s'établit à 50 $m^3/s$. Ce bilan de l'eau place ce cycle au troisième rang des crues les plus faibles depuis le début des observations, après celles de 1983 et 1984. Le déficit par rapport aux deux périodes de référence, 1953-85 et 1970-85, s'élève respectivement à 53 % et 32 %. Cette faiblesse des écoulements a naturellement eu des répercussions sur l'importance des flux de matières qui ont transité au bief de Kédougou.

## Les éléments en solution

Pour la période étudiée (du 25/07/1986 au 1/10/1986), la charge dissoute totale moyenne des eaux de la Gambie à Kédougou est de 37,7 mg/l (Tabl. III). La plus forte concentration (46,8 mg/l) a été observée le 7 août et la plus faible (32 mg/l) le 29 septembre. Il est vraisemblable que cette valeur minimale de 32 mg/l situe l'ordre de grandeur de la charge dissoute des eaux les plus diluées qui transitent à Kédougou. En revanche, la concentration maximale de 47 mg/l déterminée pendant la crue est certainement très inférieure à celle qui caractérise les périodes d'étiage. Ceci est vérifié à la station aval de Gouloumbou où les charges dissoutes sont passées de 41-42 mg/l, en août-septembre, à 73-77 mg/l, en avril-mai. Ce type d'évolution est habituel dans les eaux des fleuves de la zone tropicale sèche où l'évapotranspiration est importante.

Ne possédant que deux mois complets de suivi, la seule démarche envisageable pour évaluer l'exportation annuelle en éléments dissous à Kédougou a été d'admettre qu'à l'échelle mensuelle l'évolution des concentrations présente une grande similitude avec celle observée à la station aval de Gouloumbou (LO, 1984). Pour les constituants principaux (à l'exception de la silice), les concentrations mesurées en période de crue reflètent à 92 % les teneurs moyennes annuelles. Ainsi, pour le cycle hydrologique 1986/87 qui a donné lieu à un écoulement de $1{,}58 \cdot 10^9$ $m^3$, on aboutit à une estimation des flux dissous de $62{,}6 \cdot 10^3$ tonnes, ce qui correspond à une concentration moyenne annuelle en solution de 39,7 mg/l.

Les eaux de la Gambie à Kédougou sont légèrement basiques (pH moyen de 7,3). Les concentrations en silice varient très peu, autour de 10,7 mg/l ; l'évolution de la concentration en silice mime celle de la somme cations + silice puisqu'elle y contribue pour 60 %. Le calcium (3,5 mg/l) évolue parallèlement au bicarbonate ; c'est le cation majeur dans les eaux de la Gambie, il représente 50 % de la masse cationique totale. Les teneurs en magnésium et sodium varient peu autour de leurs concentrations moyennes respectives de 1,4 mg/l et 1,2 mg/l ; le potassium est le cation le moins abondant avec 0,9 mg/l. Le bicarbonate est pratiquement la seule forme anionique, le chlore ne représentant que 1 % de la charge dissoute totale. Les faibles teneurs en chlore indiquent que les eaux du bassin sont très peu affectées par l'influence océanique.

Au cours de leur cheminement entre le massif du Fouta Djalon et la station de Kédougou, les eaux de la Gambie se concentrent légèrement (Fig. 4) : leur minéralisation passe de 37 mg/l sur les têtes de

Tableau III

Évolution mensuelle de la composition chimique des eaux de la Gambie à Kédougou lors de la crue 1986/87

*Monthly evolution of chemical composition of waters from the Gambia River at Kédougou during the 1986/87 discharge*

| MOIS | n | Anions Cl (µeq/l) | Anions $HCO_3$ (µeq/l) | Cations Ca (µeq/l) | Cations Mg (µeq/l) | Cations K (µeq/l) | Cations Na (µeq/l) | $SiO_2$ (mg/l) | pH | Cond (µS/cm) | Σanion (µeq/l) | Σcation (µeq/l) | TDS (mg/l) | $Q_m$ ($m^3/s$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| JUILLET | 7 | 27 | 319 | 156 | 98 | 34 | 56 | 10,8 | 7,2 | 33 | 346 | 344 | 38,3 | 47 |
| AOUT | 31 | 18 | 313 | 166 | 95 | 23 | 50 | 10,8 | 7,3 | 33 | 331 | 334 | 37,3 | 120 |
| SEPTEMBRE | 30 | 13 | 328 | 164 | 115 | 22 | 50 | 10,6 | 7,4 | 35 | 341 | 351 | 37,7 | 229 |
| Moyenne[1] | 68 | 16 | 322 | 164 | 107 | 24 | 51 | 10,7 | 7,3 | 34 | 338 | 346 | 37,7 | 132 |
| LA GAMBIE A KEDOUGOU [2] | – | 16 | 351 | 174 | 118 | 24 | 54 | 10,7 | 7,4 | 37 | 367 | 370 | 39,7 | 50 |

n : nombre d'échantillons analysés ; Cond : conductivité à 20°C ; TDS : concentration en éléments dissous ; $Q_m$ : débit mensuelle du fleuve ; [1] : moyenne arithmétique des trois mois étudiés ; [2] : moyenne annuelle estimée.

Tableau IV

Évolution amont-aval de la composition chimique moyenne des eaux de la Gambie et du Sénégal, comparaison avec des fleuves africains

*Up-and down-stream evolution of the average chemical composition of waters from the Gambia and the Senegal rivers, compared to other African streams*

| Fleuve | GAMBIE Bassin amont | GAMBIE Kédougou | GAMBIE Gouloumbo (aval) | SENEGAL[1] Bassin amont | SENEGAL[1] Bakel | NIGER [2] | CHARI[3] Sahr | Afrique [4] | Monde [4] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| pH | 6,9 | 7,4 | 7,4 | 6,9 | 7,5 | – | 7,0 | – | – |
| Cond. | 0,031 | 0,037 | 0,048 | 0,034 | 0,065 | – | – | – | – |
| $HCO_3^-$ | 17,5 | 21,4 | 25,2 | 20,0 | 23,2 | 36,0 | 28,1 | 26,7 | 52,0 |
| $Cl^-$ | 0,6 | 0,6 | 1,2 | 0,7 | 2,1 | 0,8 | 0,5 | 3,3 | 5,7 |
| $SO_4^{2-}$ | – | – | – | – | 0,5 | 2,3 | 0,4 | 3,5 | 8,3 |
| $Ca^{2+}$ | 2,7 | 3,5 | 4,4 | 3,0 | 3,6 | 6,1 | 3,5 | 5,2 | 13,4 |
| $Mg^{2+}$ | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,6 | 1,8 | 2,2 | 1,8 | 2,1 | 3,4 |
| $K^+$ | 0,6 | 0,9 | 1,2 | 0,7 | 1,8 | 1,5 | 1,8 | 1,4 | 1,3 |
| $Na^+$ | 1,0 | 1,2 | 1,8 | 1,3 | 1,9 | 2,7 | 2,8 | 3,8 | 5,1 |
| $SiO_2$ | 13,4 | 10,7 | 9,6 | 12,7 | 8,3 | 15,4 | 19,9 | 12,1 | 10,4 |
| Charge | 37,0 | 39,7 | 45,0 | 40,0 | 43,2 | 67,0 | 58,8 | 58,1 | 99,6 |

[1] : ORANGE, 1986 ; [2] : IMEVBORE, 1970 ; [3] : GAC, 1980 ; [4] : MEYBECK, 1979

Conductivité en mS/cm à 20°C, concentrations en mg/l

bassin à 39,7 mg/l à l'exutoire (Tabl. IV). Le facteur moyen de concentration de 1,1 diffère d'un constituant à l'autre ; il est, par ordre décroissant, de 1,6 pour le potassium, 1,3 pour le sodium et le calcium, 1,2 pour le magnésium et le bicarbonate, le chlore étant constant. En revanche, la teneur en silice diminue d'environ 20 %. Enfin, de pratiquement neutres (pH = 6,9) dans le cours supérieur, les eaux de la Gambie deviennent faiblement basiques (pH = 7,4) au cours de leur itinéraire vers l'aval. Cette évolution du chimisme des eaux entre les hauteurs du Fouta Djalon et leur sortie du massif rejoint les conclusions d'ORANGE (1990) sur le fleuve Sénégal entre son bassin amont guinéen et la station de Bakel, exutoire du bassin continental. On retrouve également la même évolution entre Kédougou et Gouloumbou : augmentation des teneurs ioniques, perte de silice dissoute et légère hausse du pH (Tabl. IV).

Enfin, à l'échelle mondiale (Tabl. IV), les eaux de la Gambie, tout comme celles du Sénégal, sont peu minéralisées comparativement à celles des autres rivières de l'Ouest africain (IMEVBORE, 1970 ; GAC, 1980), ou encore, à celles de la moyenne africaine et de la moyenne mondiale (MEYBECK, 1979).

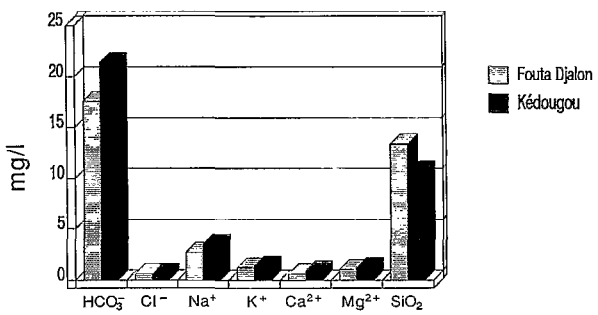


Fig. 4. — Évolution chimique pondérale des eaux drainant le versant nord du Fouta-Djalon.

*Chemical evolution expressed in weight of waters discharged from the northern watershed of the Fouta Djalon Massif.*

## Les matières en suspension

Les turbidités des eaux de la Gambie à Kédougou n'ont été mesurées qu'au cours de deux crues, en 1974 par LERIQUE (1975) et en 1986 par BAMBA (1987). L'évolution journalière des concentrations au cours des deux crues étudiées est tout à fait dissemblable bien que l'irrégularité journalière soit à chaque fois vérifiée (Fig. 5). D'autre part, il existe une grande différence dans la valeur des taux de concentration entre les deux crues ; les matières en suspension de la crue 1974/75 sont deux à trois fois plus concentrées que celles de la crue 1986/87. Lors du cycle hydrologique 1974/75, les premiers écoulements ont eu lieu au cours de la première semaine de juillet ; les charges solides, qui oscillaient fin juin entre 20 et 30 mg/l, se sont rapidement élevées en juillet pour atteindre la valeur maximale de 298 mg/l le 16/07. Les concentrations se sont ensuite stabilisées entre 50 et 100 mg/l, à l'exception des deux événements du 21/08 et du 5/10 où des turbidités de 168 mg/l et de 163 mg/l ont été enregistrées. La crue du cycle hydrologique 1986/87 présente deux particularités. Contrairement à la crue 1974/75 et aux observations habituelles effectuées sur la Gambie à Gouloumbou et sur le Sénégal à Bakel, les plus fortes turbidités ne sont pas enregistrées lors des premiers écoulements : la concentration maximale de 81 mg/l a été mesurée le 12/09, huit jours après le passage de la pointe de crue, et des maxima secondaires ont été notés à chaque recrudescence des débits en août et septembre. Le deuxième fait qui mérite d'être souligné réside dans les très faibles concentrations mesurées ; les premiers flots de juillet fournissent des charges solides relativement stables entre 15 et 20 mg/l, et les multiples reprises de débits en août et septembre ne se sont traduites que par des concentrations de l'ordre de 30 à 40 mg/l. Au stade de nos observations, le caractère singulier de cette crue paraît difficilement explicable.

Pour la crue 1986/87, possédant des mesures journalières, les flux de matières en suspension sont calculés de manière classique par la formule $M_j = C_j \cdot V_j$ avec $M_j$ le flux journalier, $C_j$ la charge solide quotidienne et $V_j$ le volume d'eau écoulée. En revanche, pour la crue 1974/75, les mesures ayant été faites tous les 3-4 jours, le flux mensuel M est estimé à partir de la moyenne mensuelle des charges solides. Enfin, le bilan annuel a été établi en supposant que l'apport des mois de juillet-août-septembre représente, comme à Gouloumbou, 87,2 % des exportations annuelles. Les résultats obtenus figurent dans le tableau V. La crue 1974/75, avec un écoulement deux

Tableau V

Évaluation des flux de matières en suspension de la Gambie à Kédougou

*Evolution of fluxes of suspended matter in the Gambia River at Kédougou*

| Mois | 1974 | | | 1986 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | V | C | M (1) | V | C (1) | M |
| Juin (*) | 22,0 | 25,9 | 570 | 19,0 | 4,9 | 94 |
| Juillet | 371,3 | 85,1 | 31 597 | 125,5 | 17,3 | 2 175 |
| Août | 1179,8 | 73,3 | 86 479 | 322,5 | 22,2 | 7 175 |
| Septembre | 1101,3 | 31,1 | 34 250 | 593,2 | 34,3 | 20 372 |
| Octobre (*) | 156,2 | 95,1 | 14 855 | – | – | – |
| Total | 2830,6 | 59,3 | 167 751 | 1060,2 | 28,1 | 29 816 |
| Bilan annuel | 3469,0 | 50,4 | 175 000 | 1576,8 | 21,6 | 34 000 |

V : volume en $10^6$ $m^3$ ; C : charge solide en mg/l ; M : flux détritique en tonnes ; (1) : variable déduite des deux autres ; (*) : mois incomplet

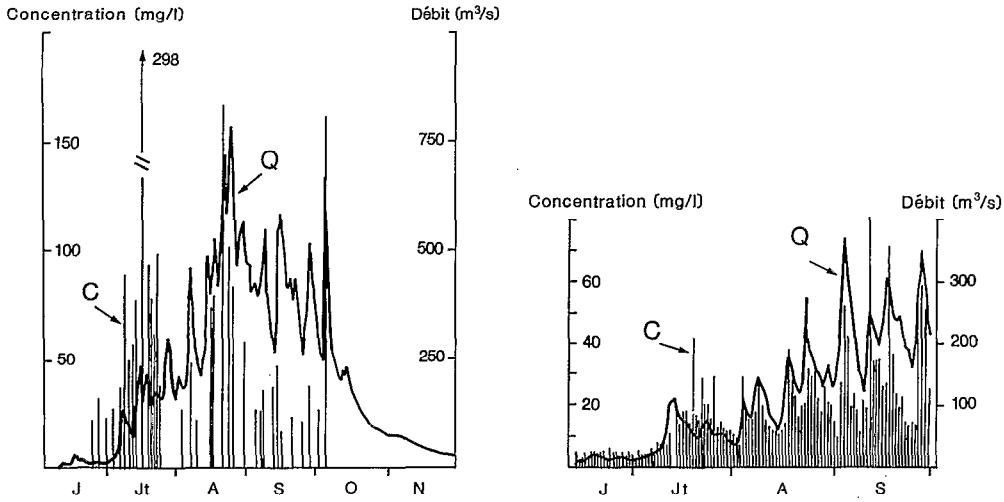


Fig. 5. — Evolution de la charge solide et des débits de la Gambie à Kédougou.

*Evolution of solid matter content compared to discharge of the Gambia River at Kédougou.*

fois plus important que la crue 1986/87, a véhiculé cinq fois plus de matériaux détritiques ; le bilan annuel est de l'ordre de $175 \cdot 10^3$ tonnes en 1974/75 et de $34 \cdot 10^3$ tonnes en 1986/87 avec des concentrations annuelles respectives de 50 mg/l et 22 mg/l.

En l'absence de détermination granulométriques, nous citons à titre indicatif les résultats obtenus par LO (1984) sur quelques échantillons recueillis à Gouloumbou. La fraction argileuse prédomine en toutes saisons ; elle est mieux représentée lors des premières manifestations de la crue. Les limons très fins sont abondants et leur quantité varie en sens inverse de celle des argiles.

Les diffractogrammes de poudre obtenus sur les matières en suspension de Kédougou sont analogues à ceux de Gouloumbou. Ils révèlent la présence constante de quartz, de kaolinite et d'argiles 2/1. Ces trois espèces minérales peuvent être accompagnées de feldspaths et de goethite. La répartition entre les différents constituants de la phase argileuse ne montre pas de différence fondamentale entre les échantillons prélevés lors des premiers écoulements ou en pleine crue ou, encore, en phase de tarissement. La kaolinite constitue, en toutes saisons, le minéral argileux dominant ; elle est bien cristallisée et ne semble subir aucune transformation lors de son cheminement vers l'aval. Son abondance reflète le caractère monosiallitique de la pédogénèse régnant sur le bassin. L'illite, dont la teneur augmente en cours de crue, est toujours bien représentée. La smectite existe en plus faible quantité de même que les interstratifiés difficilement identifiables : la persistance d'une réflexion vers 12 Å sur les enregistrements traités à l'éthylène-glycol laisse supposer qu'il s'agit d'intergrades du type 10-14 V et 10-14 C, mélanges d'illite-vermiculite et d'illite-chlorite. La gibbsite est absente de la fraction argileuse.

Les analyses chimiques (Tabl. VI) montrent que les matières en suspension de la Gambie à Kédougou sont essentiellement constituées de silice (52 %), d'alumine (19 %) et de fer (9 %), reflétant ainsi la composition chimique des sols de l'amont. Un second groupe moins important réunit le potassium, le titane et le magnésium. Trois éléments apparaissent en quantités négligeables : le calcium, le phosphore et le sodium. L'importance relative de l'eau de consti-

Tableau VI

Chimie des matières en suspension de la Gambie à Kédougou (en % d'oxyde)

*Chemistry of suspended matters in the Gambia River at Kédougou (% oxides)*

| Station | GAMBIE Kédougou | SENEGAL Bakel |
|---|---|---|
| $SiO_2$ | 52,3 | 55,3 |
| $Al_2O_3$ | 19,0 | 19,5 |
| $Fe_2O_3$ | 9,3 | 8,0 |
| $TiO_2$ | 0,98 | 0,93 |
| $Mn_3O_4$ | 0,05 | 0,06 |
| $P_2O_5$ | 0,23 | – |
| CaO | 0,20 | 0,30 |
| MgO | 0,93 | 1,08 |
| $K_2O$ | 1,82 | 1,53 |
| $Na_2O$ | 0,11 | 0,29 |
| $H_2O^+$ | 15,4 | 12,1 |
| Total | 100,32 | 98,49 |

$H_2O^+$ : perte à 1000 °C

tution (15 %) est liée à l'abondance des argiles. Les teneurs en éléments traces traduisent également la monotonie de composition chimique des matières en suspension. Les concentrations moyennes exprimées en ppm sont par ordre décroissant : baryum (300), zirconium (280), chrome (200), vanadium (170), zinc (80), nickel et cuivre (60), strontium (30) et cobalt (20). Les variations de composition chimique au cours de la crue sont faibles. On note seulement les plus forts pourcentages de silice dans les premiers flots et les plus fortes teneurs en potassium, alumine et magnésium lorsque les eaux sont les plus turbides. Comparativement aux matières en suspension du Sénégal transitant à Bakel (ORANGE, 1986), les eaux de la Gambie livrent des matériaux légèrement moins alumineux, plus potassiques et avec une teneur en eau de constitution plus importante.

La connaissance de la composition chimique des matières en suspension permet d'évaluer les proportions relatives des différentes espèces minérales reconnues par les diffractogrammes RX. La kaolinite, l'illite et le quartz sont les minéraux prédominants ; leurs proportions moyennes respectives sont de 27 %, 22 % et 22 %. Les smectites et les interstratifiés sont moins abondants (environ 10 % chaque). La goethite atteint un pourcentage de 4 % et les plagioclases sont à peine décelable (0,2 %), les matières amorphes sont estimées à 3,5 % (GAC, 1980). Les seules variations notables avec la composition minéralogique des matières en suspension du fleuve Sénégal à Bakel concernent les pourcentages respectifs de smectites et d'interstratifiés, les quantités cumulées restant identiques dans les deux collecteurs. L'agression des eaux de ruissellement sur les sols des deux bassins livrent aux provinces respectives de l'aval des matériaux de même nature minéralogique et chimique.

En l'absence de mesures sur la chlorophylle, faisant donc abstraction de la production d'algues en milieu aquatique, on admet que la totalité du carbone organique particulaire (COP) est issue des horizons supérieurs des sols du bassin. Les teneurs en COP sont comprises entre 0,4 et 2,5 mg/l ; elles sont du même ordre de grandeur que celles données par LO (1984) à la station aval de Gouloumbou (de 0,5 à 3,4 mg/l). La teneur moyenne de 1,1 mg/l correspond à un flux annuel de COP de $1{,}7 \cdot 10^3$ tonnes, soit un transport spécifique de 0,15 t/km²/an, du même ordre de grandeur que celui estimé par LESACK *et al.* (1984) pour le bassin de la Gambie à Gouloumbou (0,12 t/km²/an). Le taux de COP est inversement proportionnel à la concentration de matières en suspension : les plus faibles charges solides (<10 mg/l) correspondent à des taux de 8 %, les plus fortes (de 40 à 50 mg/l) à des valeurs de 4 %. Ces résultats confirment les travaux de MEYBECK (1984) sur la décroissance générale du COP (en %) avec la concentration en suspension ; les points représentatifs de la Gambie s'inscrivent parfaitement dans le schéma classique d'interdépendance entre COP et MES observée à l'échelle planétaire (Fig. 6). Le niveau moyen du COP (5,1 %) dans les

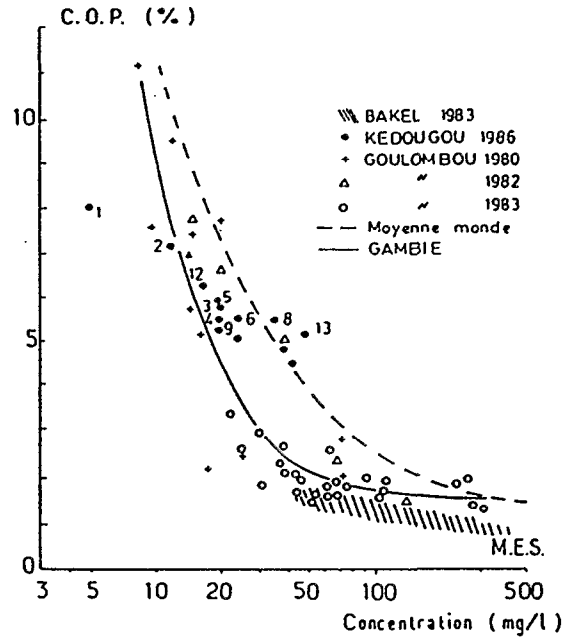


Fig. 6. — Relation entre la charge solide et la teneur en carbone organique particulaire (COP) (d'après MEYBECK, 1984).

*Relation between solid matter and concentration of particulate organic carbon (COP) (after MEYBECK, 1984).*

matières en suspension des eaux de la Gambie est bien plus important que dans celles du Sénégal (de 1 à 2 %). C'est également une valeur élevée comparativement à d'autres fleuves du monde : 1,8 % pour l'Amazone (EDMOND *et al.*, 1981) ; 2,4 % pour le Yang-Tsé-Kiang (MILLIMAN *et al.*, 1984) ; 2,5 % pour l'Orénoque (DEGENS, 1982). Cette particularité est liée au faible taux de matières en suspension de la Gambie. Des investigations plus approfondies sur la nature du COP et sur les formes d'origine planctonique sont à réaliser.

## Bilan annuel des flux de matières exportés à Kédougou et premier bilan de l'altération chimique et de l'érosion mécanique en milieu nord-guinéen

Pour le cycle hydrologique 1986/87, le flux total annuel de matières exportées s'élève à $96{,}6 \cdot 10^3$ t dont 65 % pour les matières dissoutes, 33,2 % pour les matières minérales en suspension et 1,8 % pour le carbone organique particulaire (Fig. 7). Le tableau VII répertorie pour les éléments majeurs, les flux spécifiques exportés. Toutes formes d'exportation confondues, le flux relatif des éléments principaux est le suivant : Si > Ca > Mg > Na > K > Al > Fe (Fig. 8). Le sodium (99 %), le calcium (99 %) et dans une moindre part le magnésium (91 %) sont principalement exportés sous formes dissoutes. Le potassium

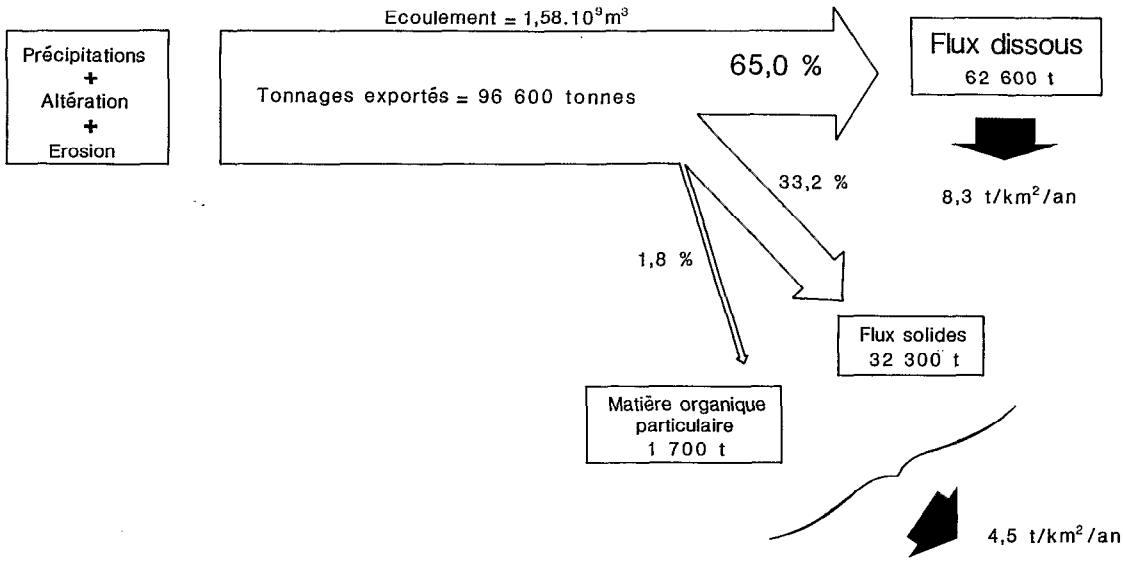


Fig. 7. — Bilan quantitatif des flux de matières exportés par la Gambie au bief de Kédougou en 1986.

*Quantity balance of fluxes of exported matters by the Gambia River at Kédougou, 1986.*

migre essentiellement en solution mais une partie non négligeable (14 %), incorporée dans les édifices micacés, accompagne les matières en suspension. Le silicium se partage de manière égale entre les deux phases. Enfin, l'aluminium et le fer sont uniquement évacués sous formes figurées dans les matières en suspension. Tout au long du cycle hydrologique, la répartition entre phase en solution et phase en suspension subit des variations. Les éléments les plus solubles (Na, Ca, Mg, K) sont évacués quelle que soit la période de l'année alors que les éléments les moins solubles (Al, Fe) ne sont susceptibles de quitter le bassin que lors des périodes de hautes eaux lorsque la charge en suspension est importante. Ceci explique que ces deux éléments soient les plus faiblement exportés par la Gambie qui a montré en 1986/87 une très faible charge particulaire.

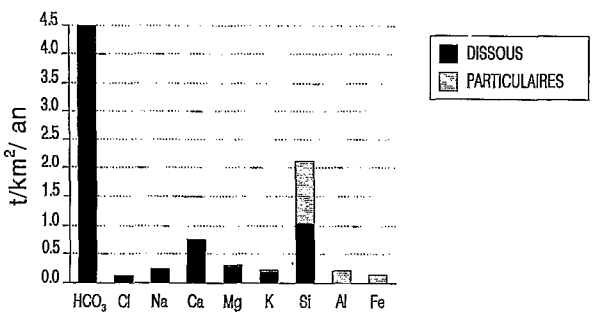


Fig. 8. — Flux spécifiques des éléments majeurs exportés par la Gambie au bief de Kédougou en 1986.

*Specific fluxes of major elements exported by the Gambia River at Kédougou, 1986.*

Tableau VII

Flux spécifiques des éléments majeurs exportés par la Gambie au bief de Kédougou

*Specific fluxes for major elements exported by the Gambia River at the Kédougou reach*

| | DISSOUS t/km²/an | % | SUSPENSION t/km²/an | % | TOTAL t/km²/an |
|---|---|---|---|---|---|
| $HCO_3$ | 4,50 | 100 | – | 0 | 4,50 |
| Cl | 0,13 | 100 | – | 0 | 0,13 |
| Na | 0,25 | 99 | 0,002 | 1 | 0,25 |
| Ca | 0,74 | 99 | 0,006 | 1 | 0,75 |
| Mg | 0,29 | 91 | 0,025 | 9 | 0,32 |
| K | 0,19 | 86 | 0,033 | 14 | 0,22 |
| Si | 1,05 | 49 | 1,08 | 51 | 2,13 |
| Al | – | 0 | 0,22 | 100 | 0,22 |
| Fe | – | 0 | 0,14 | 100 | 0,14 |

L'absence de roches carbonatées dans le soubassement géologique du bassin et l'éloignement des océans permettent de limiter le calcul du soutirage chimique qui affecte le manteau d'altération depuis la surface jusqu'à la roche saine, aux seuls cations, et à

la silice. En effet, le bicarbonate et le chlore, qui ne transitent qu'à l'état soluble, sont pour l'essentiel d'origine externe au bassin. Le soutirage chimique s'élève alors à $27,9 \cdot 10^3$ t, tonnages du même ordre de grandeur que les $34 \cdot 10^3$ t dues à l'ablation mécanique. L'altération chimique spécifique se chiffre ainsi à 3,7 t/km²/an et l'érosion mécanique spécifique à 4,5 t/km²/an. Ces taux sont deux fois moins importants que ceux évalués par GAC et PINTA (1973) pour l'Ouham (Tchad), respectivement 7,5 t/km²/an et 10 t/km²/an. En revanche, le taux d'altération chimique est du même ordre de grandeur que celui donné par GROVES (1972) pour le Niger (4,2 t/km²/an) ; le taux d'érosion mécanique est quant à lui très largement inférieur à celui calculé par ce même auteur (11,8 t/km²/an).

## CONCLUSION

Deux enseignements majeurs ressortent de cette première reconnaissance géochimique des eaux drainant les versants ouest, nord et NE du Fouta Djalon. Premièrement, les hauteurs du Fouta Djalon livrent actuellement aux provinces de l'aval des eaux proches de la neutralité et faiblement minéralisées (moyenne de 33 mg/l) où prédominent le bicarbonate, le calcium et le magnésium. Deuxièmement, la dynamique d'altération dominante dans les sols est de type monosiallitique avec une prédominance très marquée de la kaolinite. Cependant, dans le détail, se différencient des eaux fortement bicarbonatées calciques et très peu chlorurées drainant le NE du Fouta Djalon les eaux à charge dissoute plus faible (<35 mg/l) drainant le NW, l'ouest et l'est de ce massif montagneux où la déficience en calcium confère en corollaire un caractère fortement magnésien à ces eaux. D'autre part, la dynamique de la silice et des cations contenus dans les eaux de surface met en évidence une régionalisation des types d'altération. Le nord et le NE du Fouta Djalon (bassins de la Gambie et de la Falémé) semblent être à caractère bauxitique marqué alors que les bassins côtiers à l'ouest sont dominés par la bisiallitisation ; ailleurs (bassin du Sénégal) règne la monosiallitisation.

La composition chimique des eaux de la Gambie à Kédougou reflète celle des eaux drainant les hauteurs du Fouta Djalon. La silice et le bicarbonate constituent 81 % de la charge dissoute, l'ensemble des bases y contribuant pour 18 %. La faible teneur en chlore (1 % de la charge dissoute) souligne que ces eaux sont très peu affectées par l'influence océanique. En pourcentage pondéral, les éléments dissous les mieux exportés sont dans l'ordre : $HCO_3 > SiO_2 > Ca > Mg > Na > K > Cl$. Pour le cycle hydrologique 1986/87, la charge dissoute totale est estimée à 39,7 mg/l, ce qui représente une exportation dissoute spécifique de 8,3 t/km²/an. Ce sont des eaux faiblement minéralisées comparativement aux rivières ouest-africaines.

L'évolution journalière de la concentration des matières en suspension enregistrée lors de la crue 1986/87 est exceptionnelle : les plus fortes turbidités n'ont pas été observées lors des premiers écoulements mais quelques jours après le passage de la pointe de crue. Ce comportement inhabituel pour un fleuve de cette région explique le faible taux de matières en suspension mesuré. Pour le cycle hydrologique 1986/87, la charge annuelle particulaire est estimée à 22 mg/l seulement, soit une exportation particulaire spécifique de 4,5 t/km²/an ; les travaux de LERIQUE (1975) effectués sur la crue 1974/75 aboutissent à une moyenne double de 50 mg/l. Cette différence importante est probablement due à la faiblesse actuelle des précipitations. La fraction minérale de ces matières en suspension est constituée à 70 % d'argiles. Parmi les espèces minérales exportées, la kaolinite (27 %) domine puis viennent ensuite l'illite (22 %), le quartz (22 %), les interstratifiés et les smectites (10 % chacun), la goethite (4 %) et les matières amorphes estimées à 3,5 %. En tonnage, les éléments chimiques les mieux évacués sous forme particulaire sont dans l'ordre : $Si > Al > Fe > K > Ti > Mg > Ca > Na$. Ces caractéristiques minéralogiques des matières en suspension de la Gambie à Kédougou sont identiques à celles enregistrées à la station aval de Gouloumbou et à celles du Sénégal à Bakel. Enfin, il faut noter le fort taux de carbone organique particulaire qui représente 5,1 % des matières en suspension ; cette caractéristique est imputable à la faible importance des exportations en suspension.

Finalement, toutes formes d'exportation confondues, le flux relatif des éléments majeurs est le suivant : $Si > Ca > Mg > Na > K > Al > Fe$. La répartition des différents éléments entre phase solide et phase dissoute est directement fonction de la mobilité des éléments au cours de l'altération. Les cations basiques sont presque entièrement évacués en solution. L'aluminium et le fer accompagnent la phase en suspension. La silice se partage équitablement entre les deux formes de transport. La faible exportation des éléments Al et Fe souligne la faiblesse de l'érosion mécanique enregistrée sur le bassin amont de la Gambie lors de la crue 1986/87. Pour cette période, altération chimique spécifique et érosion mécanique spécifique sont du même ordre de grandeur (respectivement 3,7 t/km²/an et 4,5 t/km²/an).

*Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 1er juin 1990.*

# BIBLIOGRAPHIE


BAMBA (S.B.), 1987. — Le bilan de l'eau et de la matière dans le haut bassin guinéen du fleuve Gambie. Thèse 3e cycle, Géologie, Univ. Dakar, 147 p.

BARRETO (P.S.), 1963. — Étude pédologique du secteur Sud de la surface d'études pédo-agronomiques dans les hauts-plateaux du Fouta-Djalon. Mission CCTA/FAMA, Rapp. Ministère Économie Rurale de Guinée, Conakry, 88 p. *multigr.*

BASSOT (J.P.), 1966. — Étude géologique du Sénégal Oriental et de ses confins guinéo-maliens. *Mém. BRGM*, Paris, 40, 322 p.

CHAPERON (P.), GUIGUEN (N.), 1974. — Étude hydrologique du bassin continental du fleuve Gambie. Rapport Terminal I : résultats des mesures et analyses des données. Rapp. ORSTOM, Dakar, 83 p. *multigr.*

CHAUVEL (A.), 1967. — Notice explicative de la carte pédologique du Sénégal au 1/200 000. Feuilles de Kédougou et de Kéniéba-Kossanto. Rapp. ORSTOM, Dakar, 155 p. *multigr.*

DACOSTA (H.) 1985. — Essai d'extension des échantillons de débits moyens mensuels et annuels du fleuve Gambie. Rapp. ORSTOM, Dakar, 72 p. *multigr.*

DEGENS (E.), 1982. — Transport of carbon and minerals in major world rivers. *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Hamburg*, 52 : 91-332.

DESCROIX (L.), 1986. — Projet pour la première partie de la monographie hydrologique du bassin du fleuve Gambie. Composantes géographiques et climatiques. Rapp. ORSTOM, Dakar, 54 p. *multigr.*

EDMOND (J.M.), BOYLE (E.A.), GRANT (B.), STALLARD (R.F.), 1981. — The chemical mass balance in the Amazon plume. I. The nutrients. *Deep Sea Research*, 28 A, 11 : 1339-1374.

FRITZ (B.), 1975. — Étude thermodynamique et stimulation des réactions entre minéraux et solutions, application à la géochimie des altérations et des eaux continentales. Thèse Sciences, Univ. Strasbourg, *Mém. Sci. Géol.*, 41, 152 p.

GAC (J.Y.), PINTA (M.), 1973. — Bilan de l'érosion et de l'altération en climat tropical humide, estimation de la vitesse d'approfondissement des profils : étude du bassin versant de l'Ouham (R.C.A.). *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, vol. V : 83-96.

GAC (J.Y.), 1980. — Géochimie du bassin du lac Tchad. Bilan de l'altération, de l'érosion et de la sédimentation. *Travaux et Documents ORSTOM*, Paris, 123, 251 p.

GAC (J.Y.), BOUCHEZ (J.M.), ORANGE (D.) *et al.*, 1987a. — Géochimie des eaux du Fouta Djalon, flux dissous et particulaires en Haute Gambie (Kédougou et Gouloumbou), contribution à la monographie de la Gambie. Rapp. ORSTOM, Dakar, 102 p.

GAC (J.Y.), FAURE (H.), 1987b. — Le « vrai » retour à l'Humide au Sahel est-il pour demain ? *C.R. Acad. Sci.*, Paris, 305, série II : 777-781.

GROVES (A.T), 1972. — The dissolved and solid load carried by some west african rivers : Senegal, Niger, Benoue and Shari. *J. Hydro.*, 16 : 277-300.

IMEVBORE (A.M.A.), 1970. — The chemistry of the river Niger in the Kainji reservoir area. *Arch. Hydrobiol.*, vol. 2 : 371-380.

LERIQUE (J.), 1975. — Les transports solides en suspension dans la Gambie à Kédougou et à Gouloumbou. Résultats de la campagne de 1974. Rapp. ORSTOM, Dakar, 11 p. *multigr.*

LESACK (L.F.W.), HECKY (R.E.), MELACK (J.M.), 1984. — Transport of carbon, nitrogen, phosphorus and major solutes in the Gambia river (West Africa). — *Limnology and Oceanography*, 28 : 273-286.

LO (H.M.), 1984. — Le bassin de la Gambie en amont de Gouloumbou. Thèse 3e cycle, Géographie, Univ. Nancy II, vol. 6, 394 p.

MAIGNIEN (R.), 1958. — Le cuirassement des sols en Guinée, Afrique Occidentale. *Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.*, Strasbourg, 16, 239 p.

MEYBECK (M.), 1979. — Concentration des eaux fluviales en éléments majeurs et apports en solution aux océans. *Rev. Géol. Dyn. Géogr. Phys.*, 21, 3 : 215-246.

MEYBECK (M.), 1984. — Les fleuves et le cycle géochimique des éléments. Thèse Sciences, Univ. Paris VI, 558 p.

MEYBECK (M.), LO (H.M.), CAUWET (G.), GAC (J.Y.), 1987. — Geochemistry of the sahelian Gambia river during the 1983 highwaterstage. *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Hamburg*, Proceed. 4th Symposium « Transport of carbon and minerals in world rivers » Tian Jin (China), mai 1985, nº 64 : 461-473.

MILLIMAN (J.), QUINCHUN (X.), ZUOSHENG (Y.), 1984. — Transfer of particulate organic carbon and nitrogen from the Yangtze river to the ocean. *Amer. J. Science*, 248 : 824-834.

OLIVRY (J.C.), 1983. — Évaluation des données hydrologiques et météorologiques disponibles sur le bassin du fleuve Gambie. Rapp. ORSTOM, Dakar, 91 p. *multigr.*

ORANGE (D.), 1986. — Bilan de l'altération chimique et de l'érosion mécanique sur le haut-bassin du fleuve Sénégal. Mém. de DEA, Univ. Orléans Rapp. ORSTOM, Dakar, 111 p.

ORANGE (D.), 1990. — Hydroclimatologie du Fouta Djalon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique. Thèse Sciences, Univ. Strasbourg, en rédaction.

ROCHETTE (C.), 1974. — Le bassin du Sénégal, monographie hydrologique. *Monogr. Hydrol.* nº 1, ORSTOM, Paris, 325 p.

TARDY (Y.), 1969. — Géochimie des altérations. Étude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. *Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.*, 31, 199 p.

TORCHINE (N.S.), 1976. — Carte géologique de la République de Guinée au 1/200 000 ; feuille D 28 XXXV et Sud de la feuille D 28 XXIX (Youkounkoun). Conakry. Rapp. *multigr.*, 165 p.

VILLENEUVE (M.), 1984. — Étude géologique de la bordure Sud-Ouest du craton Ouest Africain. Thèse Sciences, Univ. Aix-Marseille, 552 p.