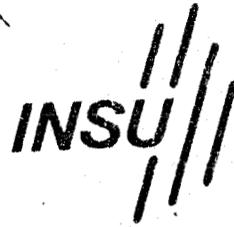




CENTRE NATIONAL  
DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

*Y. Boul*



INSTITUT FRANÇAIS DE  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
POUR LE DÉVELOPPEMENT  
EN COOPÉRATION

PROGRAMME ENVIRONNEMENT GEOSPHERE INTERTROPICALE  
PEGI

COLLOQUE GRANDS BASSINS FLUVIAUX  
PÉRI ATLANTIQUES : CONGO, NIGER, AMAZONE

22, 23 et 24 NOVEMBRE 1993  
Au siège de l'ORSTOM  
213 rue La Fayette  
75010 PARIS

PROGRAMME :

- . Hydroclimatologie du bassin congolais
- . Flux de matière du Fleuve Congo
- . Oubangui, Ngoko et autres affluents du Congo
- . Le Fleuve Niger
- . Le bassin Amazonien (Amazone, Madeira, Tocantins)
- . Approches couplées "hydrologie, géochimie, géophysique"  
des transferts hydriques

Organisateurs : Jacques BOULEGUE, Jean-Claude OLIVRY

Secrétariat  
Renseignements  
et Inscriptions

Dr Bernard HIERONYMUS - Mme Geneviève LETEMPLIER  
Laboratoire de Géochimie - Casier Postal 124, UPMC,  
4, place Jussieu - 75252 PARIS CEDEX 05, FRANCE  
Tél. : 44 27 50 06 Fax : 44 27 51 41

cliché : J. Boulègue . Rio Negro et Rio Solimoes

1

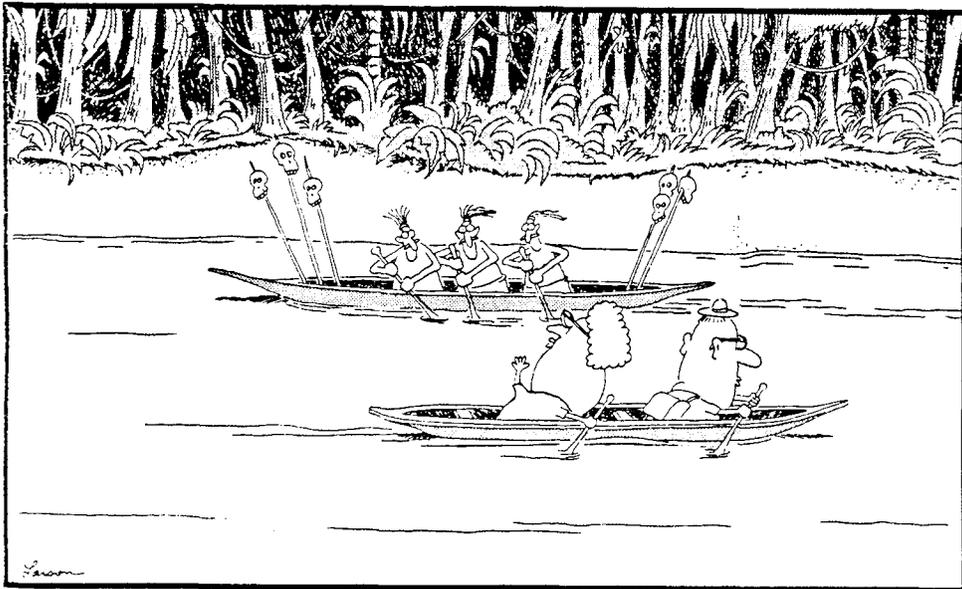
Le programme Grands Bassins Fluviaux peri-atlantiques avait été initié dans le cadre du P.I.R.A.T. en 1988 avec l'ambition de faire un suivi sur 10 ans des grands fleuves de la façade atlantique de l'Afrique et de l'Amérique du Sud. L'implantation en Afrique s'est poursuivie grâce au P.E.G.I. L'implantation en Amérique du Sud a débuté grâce aux efforts de l'ORSTOM et de participants du programme DBT de l'INSU.

Les résultats présentés aujourd'hui correspondent principalement à environ 5 ans d'acquisition de données pour le bassin du Congo. Les résultats acquis sur le Niger et ceux acquis sur le bassin Amazonien sont aussi présentés.

Durant les années 1991, 1992 et 1993, le Programme Environnement Géosphère Intertropicale a bénéficié de l'aide de l'INSU, de l'ORSTOM et de la DRED.

Les dessins de Gary Larson sont reproduits par autorisation de l'auteur et de Andrews and Mc Meel et Futura Publications.

# - BASSIN CONGOLAIS



## LES ETUDES DU PEGI SUR LE BASSIN DU CONGO-ZAIRE DANS LE CONTEXTE DEFICITAIRE DES RESSOURCES EN EAU DE L'AFRIQUE HUMIDE.

J.C. Olivry, G. Mahé, J.P. Bricquet

### Résumé :

Le programme "Grands Bassins Fluviaux" avait inscrit dans la durée le suivi du régime des exportations de matières particulaires et dissoutes des grands fleuves intertropicaux, l'objectif étant d'évaluer l'incidence des fluctuations hydroclimatiques sur leur fonctionnement biogéohydrodynamique. Après huit années d'observations sur le bassin du fleuve Congo, force est de constater que celles-ci ont été faites dans un contexte déficitaire persistant.

L'évolution récente des régimes hydrologiques en Afrique intertropicale, tributaire de la façade atlantique du continent, est essentiellement marquée par un appauvrissement généralisé des ressources en eau, depuis plus de vingt ans pour l'Afrique tropicale sèche, significatif depuis les années 80 en Afrique Centrale. Les grands fleuves de l'Afrique humide des zones tropicales et équatoriales sont sérieusement affectés par des écoulements déficitaires. Une tendance quasi générale à la baisse est observée ; celle-ci va bien au-delà de l'irrégularité interannuelle observée à l'occasion de déficits pluviométriques annuels ponctuels. Ainsi, la plus grande zone forestière intertropicale du monde, après l'Amazonie, est soumise globalement à un appauvrissement notable de ses ressources en eau.

En Afrique Centrale, les débits du Congo sont connus depuis 1903 ; les observations commencent en 1930 sur l'Oubangui, 1935 sur l'Ogooué et 1948 sur la Sangha. L'évolution de l'hydraulicité de ces quatre fleuves a été étudiée à partir du rapport entre la variation d'hydraulicité et l'écart-type des hydraulicités. Ceci permet de mesurer de manière comparable l'impact du changement climatique sur des bassins dont la variabilité naturelle est différente (régime équatorial ou tropical).

L'analyse la plus intéressante concerne le fleuve Congo-Zaire, de par sa durée et sa représentativité spatiale. Le module interannuel sur l'ensemble de la période d'observation est de  $41000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (86 ans). Les modules extrêmes sont de  $55200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  en 1962 et  $33300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  en 1984. Le fleuve a été relativement régulier sur toute la période antérieure à 1960. La période abondante entre 1960 et 1970 est marquée par les crues exceptionnelles de 1961, 1962 et 1969. La décennie 71-80 est proche de la normale avec une période largement déficitaire centrée sur 1972 et 1973. La décennie 1981-1990

connaît un appauvrissement général des écoulements notamment en 1984. Ce schéma se retrouve sur l'Oubangui à Bangui où toute la séquence est déficitaire depuis 1970 avec une accentuation du phénomène dans les années 80. L'Oubangui est à son plus bas niveau connu en 1990 avec un module de  $2190 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  pour une valeur moyenne de  $3970 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Sur l'ensemble de l'Afrique intertropicale humide, tributaire de la façade atlantique du continent, l'écoulement annuel moyen sur quarante ans est de 2350 milliards de  $\text{m}^3$  dont 1350 milliards pour le bassin du Congo-Zaïre. Les deux décennies déficitaires 1971-80 et 1981-1990 voient l'écoulement annuel tomber respectivement à 2190 et 1985 milliards de  $\text{m}^3$ , soit -7 et -16% des apports moyens.

L'appauvrissement de la ressource en eau est pour la décennie 1971-80 de  $160 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$  en Afrique humide,  $30 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$  en Afrique sèche (rapport de 5,3). Pour la décennie 1981-90, les valeurs sont respectivement de  $375 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$  et  $65 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$  (rapport de 5,8). Cet appauvrissement a plus que doublé d'une décennie à l'autre en dépit de précipitations moins déficitaires. Le Congo-Zaïre avec plus de 50% des apports à l'Atlantique accuse à lui seul plus du 1/3 des pertes de la dernière décennie.

L'évolution des basses eaux intègre sans doute le mieux la persistance de la période déficitaire actuelle. Depuis 1972, et de manière continue depuis 1978, les débits mensuels les plus faibles de l'Oubangui sont inférieurs à la moyenne et décroissent régulièrement. Le même phénomène est observé sur la Sangha à Ouesso depuis 1978. Sur les vingt plus faibles débits mensuels d'étiage du Congo, dix ont été observés dans les vingt dernières années. Les six plus faibles valeurs de l'échantillon sont observées après 1983, le *minimum minimorum* étant celui de l'année 1990. Cette faiblesse quasi générale des étiages traduit un amenuisement croissant des réserves souterraines des bassins fluviaux résultant du cumul des déficits pluviométriques. La vidange des nappes de versant, caractéristiques de l'hydrogéologie de la plupart des bassins fluviaux étudiés, suit une loi de tarissement à décroissance exponentielle qu'il est d'autant plus facile d'étudier que la saison sèche est bien marquée. Le tarissement des fleuves soumis au régime tropical humide montre dans la période récente une accélération de la vidange des nappes, notamment à partir de 1980 sur la Sangha et l'Oubangui. Pour les fleuves équatoriaux, les débits de tarissement sont difficilement appréhendés, mais il est probable que les aquifères de ces régions sont également touchés, comme cela est d'ailleurs observé en pays Batéké (Congo).

La puissance des crues des grands cours d'eau intertropicaux d'Afrique peut être qualifiée de très médiocre à médiocre suivant la classification de M. Pardé sur la base du calcul du coefficient de crue défini par P. Myer, A. Coutagne et M. Pardé ( $A : \text{Qm}^3\text{s}^{-1}/\text{S}^{0,5} \text{ km}^2$ ). Ainsi les valeurs extrêmes des maximums annuels de crue ont des coefficients de 20 à 8 pour l'Oubangui, 40 à 24 pour le Congo-Zaïre. Au cours des deux dernières décennies, la médiocrité de la puissance des crues n'a fait que s'accroître; par rapport aux valeurs moyennes, les coefficients de crue ont été divisés par 1,7 pour l'Oubangui et 1,2 pour le Congo où la variabilité interannuelle est moindre. Pour l'Oubangui, sur les dix

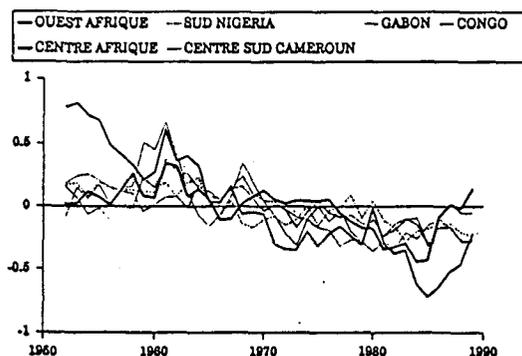
plus faibles valeurs de l'échantillon de 58 ans, huit concernent les dix dernières années, les deux autres étant celles de 1973 et 1979.

Ce qui est vrai pour l'Oubangui ne l'est plus tout à fait pour le Congo à Brazzaville. La distribution des maximums annuels reste plus aléatoire et la baisse des écoulements annuels paraît plus dépendante du déficit des maximums secondaires, dits de printemps, comme cela a été vu pour l'Ogooué. Ceci signifierait que la crue maximale du Kasaï en décembre est peu affectée par le contexte déficitaire de la région.

Que ce soit pour les étiages, l'écoulement annuel ou les maximums de crue, les observations récentes montrent une certaine durabilité du déficit hydrologique, dans le même temps où les précipitations voient leur déficit diminuer. On constate notamment que pour des saisons des pluies équivalentes le maximum de crue de la période actuelle reste nettement plus faible que dans le passé. Il faut rechercher la persistance de l'amointrissement de la puissance des crues dans une contribution réduite des apports d'origine souterraine.

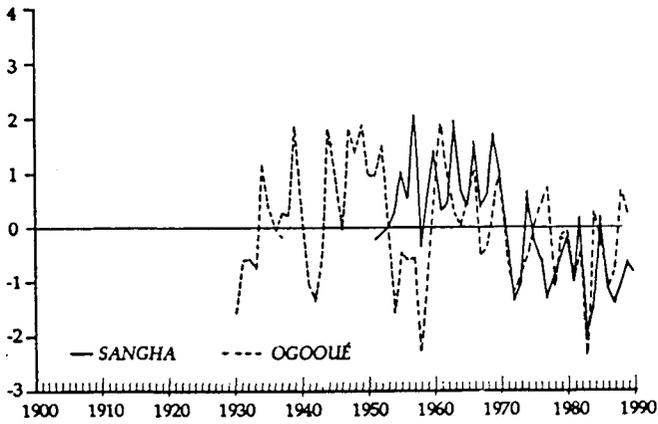
Le régime déficitaire des précipitations de la période actuelle est bien évidemment responsable de la baisse de puissance des crues. Il a d'abord un effet immédiat, avec des crues réduites en puissance et (ou) en durée suivant la saison des pluies. Il a ensuite un effet mémoire avec le cumul de déficits des années antérieures et des apports réduits des nappes phréatiques. On doit donc s'attendre à une certaine persistance des faibles maximums de crue même dans l'éventualité d'un retour à une séquence humide.

Par rapport aux thèmes d'étude du PEGI, ceci conduit à nuancer la représentativité des mesures de flux de matière dans le contexte d'une hydraulité déficitaire persistante. La contribution plus réduite des apports d'origine souterraine entraîne très probablement une exportation de matières dissoutes inférieure à ce qu'elle serait en période d'hydraulité normale. Bien que la diminution des écoulements superficiels ait eu aussi un impact sur le transport de matières en suspension, le rapport matière particulaire/matière dissoute est probablement plus élevé dans la période actuelle.



Variations hydroclimatiques.

évolution de l'écart réduit des précipitations en Afrique humide depuis 1950.



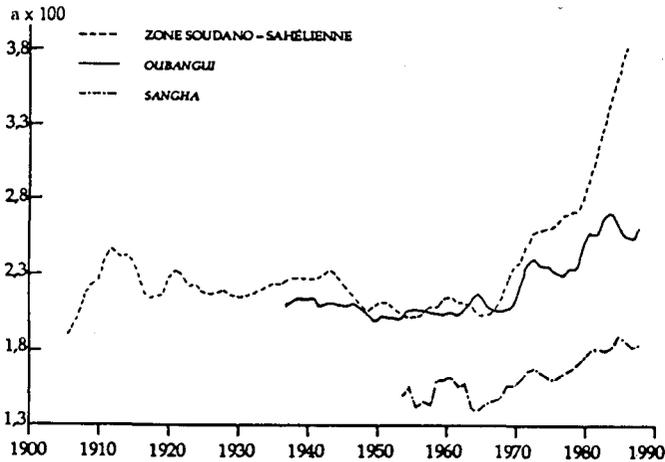
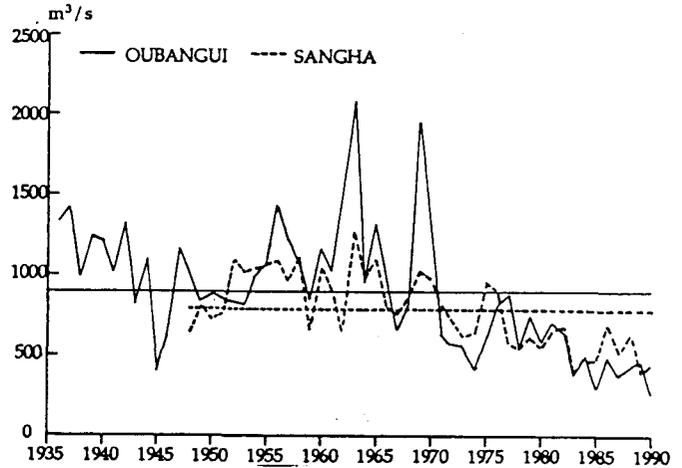
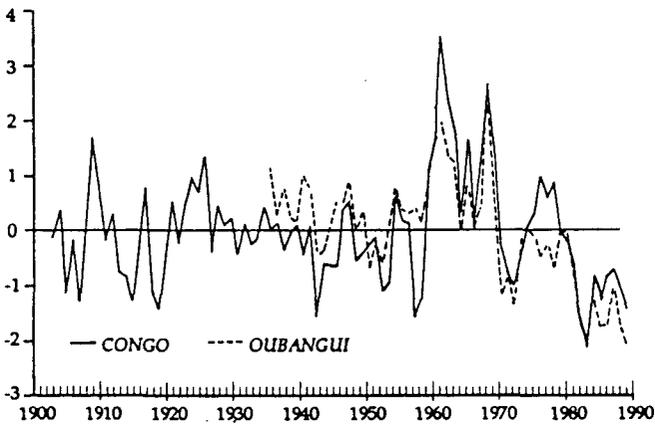
Variation de l'hydraulicité (écarts réduits) depuis l'origine des observations pour l'Afrique sèche et quatre grands bassins fluviaux d'Afrique centrale

L'écart réduit d'une variable x est la différence entre la valeur i et sa moyenne rapportée à l'écart type de cette variable

$$= \frac{x_i - \bar{X}}{\sigma_{xi}}$$

Variation des débits mensuels d'étiage depuis l'origine des observations sur deux cours d'eau d'Afrique centrale

Les valeurs moyennes respectives sont représentées par un trait horizontal



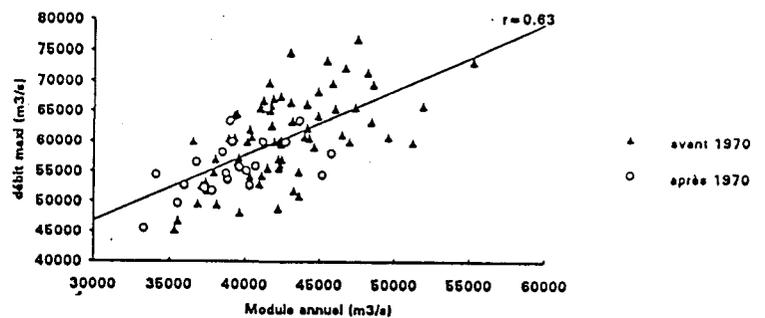
Évolution du coefficient de tarissement en Afrique soudano-sahélienne et sur deux cours d'eau d'Afrique centrale

Le débit de tarissement est donné à l'instant t par l'expression :

$$Q_t = Q_0 e^{-t/a}$$

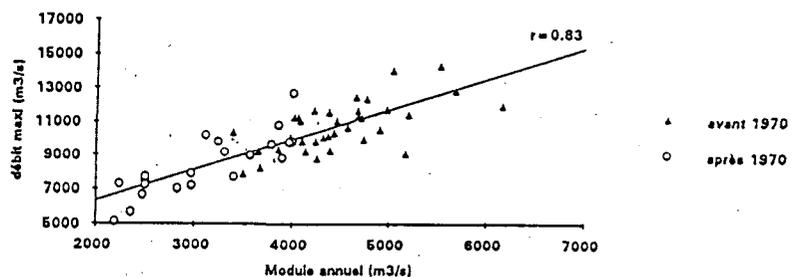
Le coefficient a est l'inverse d'un temps exprimé en jours.

Corrélation Congo (1902-1992)



Relation entre les modules annuels et les maximums annuels de crue

Corrélation Bangui (1935-1991)



**MODULATION ANNUELLE ET FLUCTUATIONS  
INTERANNUELLES DES PRECIPITATIONS SUR LE  
BASSIN - VERSANT DU CONGO.**

Gil MAHE  
HYDROLOGUE ORSTOM UR 2A  
BP 5045 34032 MONTPELLIER CEDEX 1

**RESUME**

Avec 160 postes, soit 1 station pour 22 000 km<sup>2</sup>, la densité du réseau pluviométrique utilisable pour la période 1951-1989 sur le bassin-versant du Congo à Brazzaville (3,5 millions de km<sup>2</sup>) est une des plus faible d'Afrique. Les postes sont inégalement répartis. Sur les 2/3 de la surface du bassin, à l'intérieur des frontières du Zaïre, on ne dénombre qu'environ 60 postes, soit une densité de 1 poste pour 39 000 km<sup>2</sup>, alors qu'au nord-ouest, dans les républiques du Congo, du Gabon, du Cameroun et de Centrafrique, la couverture plus dense est d'environ 1 poste pour 11 000 km<sup>2</sup>. D'autre part, le manque d'information sur les frontières est et sud du bassin, les plus sujettes à l'influence des masses d'air indienne et d'Afrique australe, est une source d'incertitude quand à la précision des résultats. Les données de pluies manquantes sont calculées par intercorrélations entre postes voisins, à partir de la Méthode du Vecteur Régional (MVR), à l'intérieur de 11 unités climatiques couvrant l'ensemble de la surface du bassin (fig.1), et contenant des postes soumis à des conditions climatiques proches. On passe ainsi de 45% à 84% d'information "pluie annuelle" sur la surface de l'Etat zaïrois, et de 60% à 94% d'information sur le bassin-versant du Congo. On peut distinguer sur le bassin du Congo 4 grandes zones d'influences climatiques différentes : le nord (Oubangui) où s'exerce une influence continentale nord-africaine ; le sud (Kasaï) soumis aux masses d'air continentales de l'Afrique australe ; l'est et le sud-est (Lualaba) sous influence de l'Océan Indien ; et le Centre-Ouest dont le climat se rattache fortement à l'Océan Atlantique. Les variations décennales diffèrent suivant les régions (fig.2), et leur combinaison se traduit pour l'ensemble du bassin par une variabilité interdécennale faible, avec une période plus humide au début des années soixante à laquelle est sont associés les modules les plus forts du siècle sur le Congo à Brazzaville, tandis que la période 1981-1989 est la plus "sèche". La comparaison des régimes mensuels moyens de pluie pour les périodes 1930-1959 et 1951-1984 indique une augmentation globale des pluies au cours de la période récente, et une modification sensible du régime mensuel. On observe une augmentation des pluies au cours des deux principales saisons pluvieuses en mars-avril et en novembre et octobre, tandis que les pluies d'août et de décembre diminuent. Les totaux de février et mai ne varient par ailleurs que très peu.

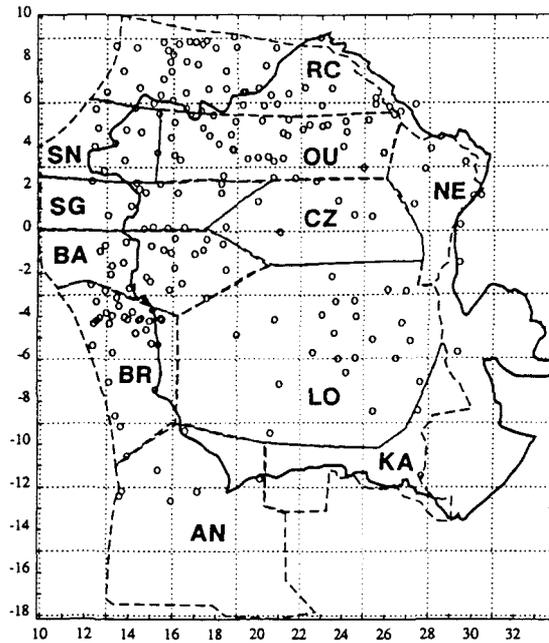


Figure 1 : Situation du bassin-versant du Congo (trait continu), et des 11 unités climatiques dans lesquelles se répartissent les 160 postes pluviométriques du bassin (traits pointillés). AN : Angola ; BA : Bateke ; BR : Brazza ; CZ : Czaire ; KA : Katanga ; LO : Lomani ; NE : Nezaire ; OU : Oubangui ; RC : Rca ; SG : Sangha ; SN : Sanaga.

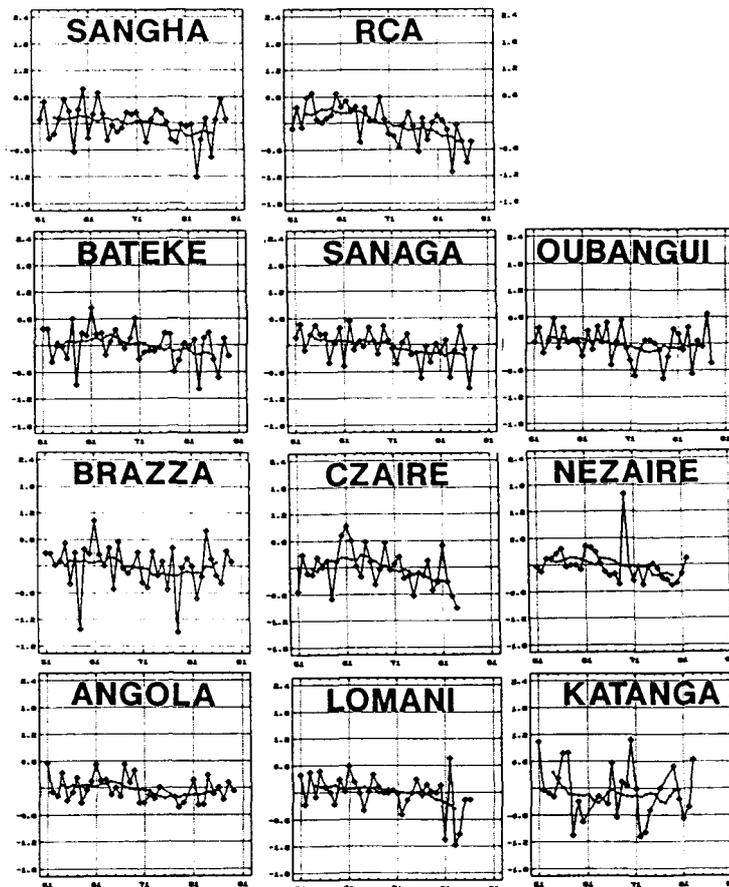


Figure 2 : Pluies annuelles moyennes centrées et réduites pour chacune des 11 unités climatiques de 1951 à 1989 et lissage sur 11 valeurs (du fait du lissage les 3 premières et les 3 dernières valeurs lissées ont été otées) (d'après Mahé et al., 1993).

## LES ECOULEMENTS DU CONGO A BRAZZAVILLE ET LA SPATIALISATION DES APPORTS

J.P. Bricquet, A. Laraque, J.C. Olivry

### Résumé :

Le fleuve Congo, avec un module annuel de  $40\,600\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  et un bassin versant d'une superficie de  $3,7\,10^6\text{ km}^2$ , est le deuxième fleuve du monde après l'Amazone. Situé de part et d'autre de l'Equateur (1/3 hémisphère Nord, 2/3 hémisphère austral), son réseau hydrographique draine une des plus grandes forêts intertropicales (35 % de la superficie du bassin). S'étendant entre les parallèles  $9^\circ\text{N}$  et  $14^\circ\text{S}$  et les méridiens  $11^\circ\text{E}$  et  $34^\circ\text{E}$ , il intéresse peu ou prou neuf pays : le Zaïre pour sa quasi-totalité, le Rwanda, le Burundi, la Centrafrique, le Congo, le Cameroun, l'Angola, la Zambie et la Tanzanie.

Long de 4 700 km, il est caractérisé par une pente générale très faible, de l'ordre de 0,033 %, dont l'évolution d'amont en aval est très irrégulière. Le Congo en effet traverse, comme la plupart de ses affluents, une succession de zones basses (les Pools) et de plaines envahies lors des crues. Le passage d'une zone à l'autre se fait par l'intermédiaire de rapides ou défilés dont l'existence peut être attribuée à des événements tectoniques parfois récents. Ses principaux affluents sont l'Oubangui et la Sangha en rive droite, la Lomani, la Ruki et le Kasai en rive gauche. La forme en cuvette du bassin est caractéristique : une vaste dépression centrale entourée de reliefs, de penéplaines et plateaux au Nord et au Sud, plus vigoureux à l'Est.

Le bassin est bien arrosé (pluviométrie moyenne de 1520 mm) avec des précipitations plus élevées dans la cuvette et sur les reliefs de l'Est du bassin (jusqu'à 2200 mm) tombant à différentes époques suivant la région considérée. Ces saisons des pluies différées de part et d'autre de l'Equateur influent directement sur les écoulements et expliquent la régularité du régime du fleuve. Les variations interannuelles du régime sont faibles puisque le rapport des modules extrêmes est de 1,67 et le rapport R débit maximum mensuel / débit minimum mensuel est seulement de 1,74. Cependant le coefficient d'écoulement n'est que de 24 %.

Les débits écoulés à Brazzaville sont le résultat du mélange de ses affluents d'origine australe et boréale et montrent :

a) Une période de basses eaux de juin à septembre, correspondant aux basses eaux du régime équatorial et à la décrue du régime tropical austral.

b) Une période de très hautes eaux d'octobre à janvier, correspondant aux apports de la partie septentrionale du bassin ( Bassin de l'Oubangui ) et de la Cuvette centrale.

c) Une seconde période de basses eaux en février-mars due aux basses eaux de l'hémisphère nord, moins accusée que celle d'août du fait de l'arrivée des hautes eaux du Kasaï

d) Une seconde période de maximum en avril-mai moins importante que celle de décembre, due aux hautes eaux de la partie méridionale du bassin ( Kasaï et Haut-Zaïre )

Les calculs de valeurs décennales et centennales montrent que le programme PEGI-GBF n'a pas bénéficié d'une hydraulité favorable puisque depuis 1986 les débits moyens annuels sont inférieurs au module interannuel (moyenne 1987/1992 :  $37\,700\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ). Des 6 années d'étude, seule l'année 1991 est très proche de la moyenne (module  $40\,500\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ). Le rapport R atteint 2, ce qui pourrait signifier que les étiages sont plus marqués. Les débits extrêmes ont été enregistrés le 27 juillet 1990 avec  $22\,700\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  et le 15 décembre 1988 avec  $59\,900\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ . L'année 1988 a un débit mensuel maximum qui est supérieur à la moyenne, toutes les autres années ayant des crues de faibles valeurs. C'est par contre l'année 1991 qui enregistre le débit d'étiage le plus fort ( $32\,900\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ), les autres années ayant des étiages très inférieurs à la moyenne des basses eaux.

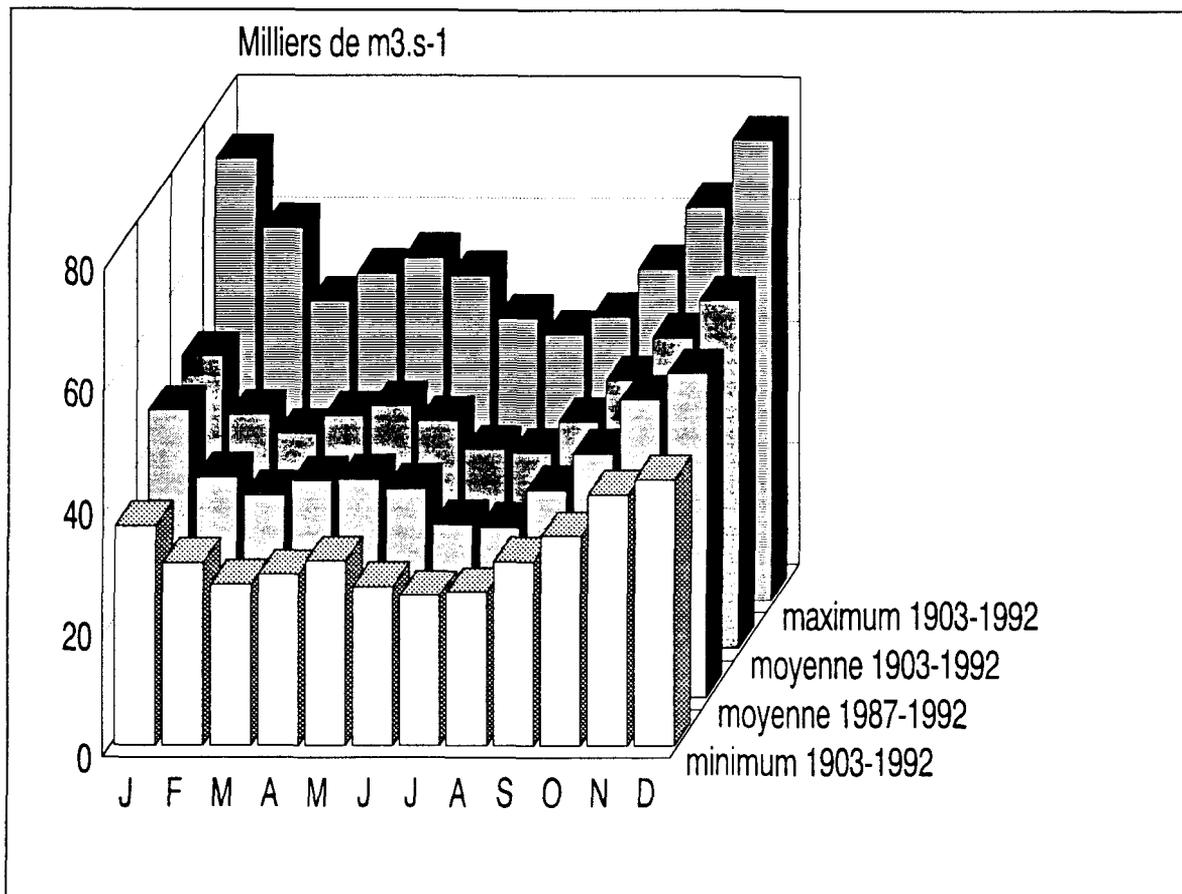
A partir des données recueillies sur plus de 100 stations hydrologiques, il a été dressé une cartographie des 10 principales zones qui contribuent à l'écoulement global de Brazzaville. En tenant compte des temps de transfert des masses d'eau, nous avons pu déterminer les participations mensuelles et annuelles de chaque grande zone d'alimentation. Au niveau annuel, le Haut Zaïre, avec une superficie de  $800\,000\text{ km}^2$ , ne représente que 5,9 % du débit moyen annuel alors que la zone des plateaux Batékés (superficie de  $45\,000\text{ km}^2$ ) y participe pour 3,1 %, tandis que la Cuvette apporte 23,8 % de l'écoulement de Brazzaville, valeur très proche de celle du Kasaï (22,7 %). Les faibles débits sortants de la zone Haut Zaïre sont à rapprocher d'abord de la faible pluviométrie arrosant cette zone mais surtout des pertes par évaporation qui se produisent sur le lac Tanganyika; en effet, si le débit spécifique du bassin versant alimentant le lac est de  $3,7\text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^2$ , il tombe à  $0,6\text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^2$  à l'exutoire du lac.

Les variations saisonnières des participations à l'écoulement de Brazzaville sont nettes. On retrouve le mouvement de balancier entre l'hémisphère Nord et l'hémisphère Sud, la Cuvette centrale, avec sa forte pluviométrie, constituant la partie la plus régulière de l'écoulement. Ainsi, lors de l'étiage de Brazzaville en août, le Haut Zaïre représente 8,9 %, le Kasaï 19,3 %, la Cuvette 24,2 %, le Haut Oubangui 10,3 % et la Sangha 4,4 %. Aux hautes eaux de décembre, ces participations ont changé pour le Haut Zaïre (2,5 %) et sont restées comparables pour les autres régions (Kasaï pour 21 %, Cuvette pour 23,6 %, Haut Oubangui pour 10,7 % et Sangha pour 4,3 %).

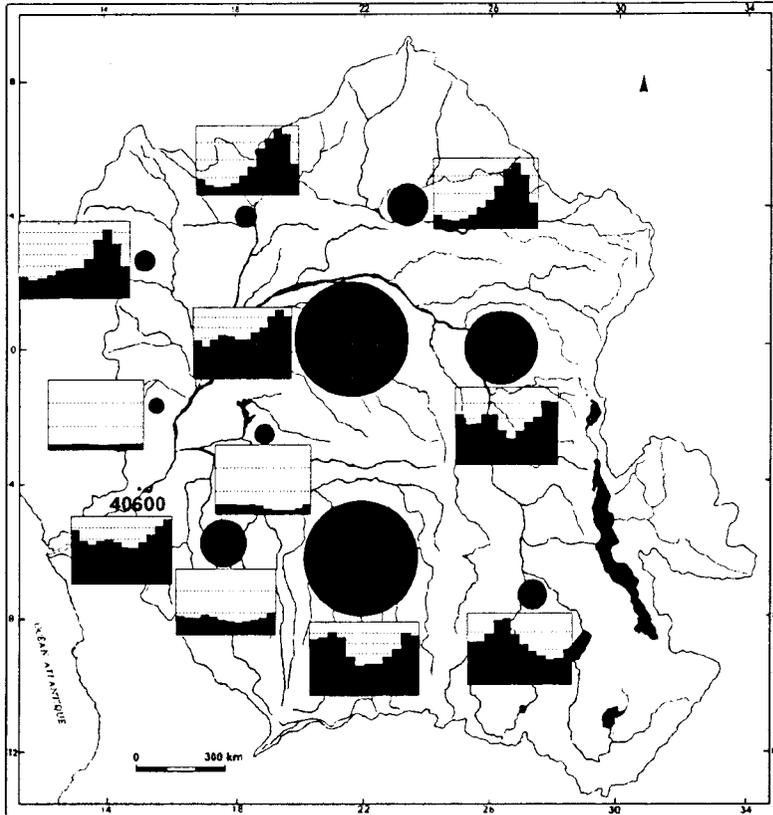
Les débits spécifiques varient de 2,5 à plus de 20 l.s<sup>-1</sup>.km<sup>2</sup> et correspondent à la distribution des précipitations.

	Minimum mensuel	Module annuel	Maximum mensuel
Centennal sec	23 600	33 300	45 000
Décennal sec	26 800	36 800	50 400
Moyenne	32 100	40 600	57 200
Décennal humide	36 500	47 100	66 600
Centennal humide	41 400	52 000	74 700

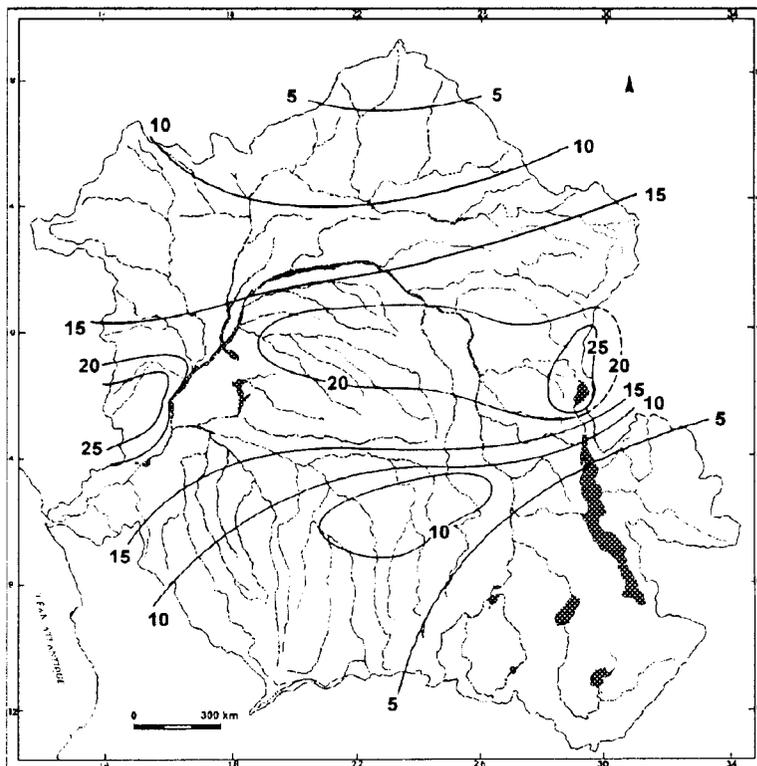
Débits caractéristiques de l'écoulement à Brazzaville pour différentes périodes de retour (en m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>).



Hydrogrammes caractéristiques du Congo à Brazzaville



Régimes et participation à l'écoulement des différentes zones d'alimentation



Bassin versant du Congo : distribution des débits spécifiques

4- 12 095  
B. Dupré, C.J. Allègre Ph. Négrel, J.Gaillardet, D. Rousseau

## ÉROSION DE LA CROÛTE CONTINENTALE: ÉTUDE DES FLEUVES

L'ensemble des techniques analytiques ainsi que les modes de traitement (inversion, modélisation ect ...) qui ont été utilisés dans le cadre de l'évolution chimique de notre planète n'avaient pas été appliqués au processus de surface. C'est pourquoi en conservant l'esprit de la géodynamique chimique, nous avons progressivement développé un programme sur l'érosion de la croûte continentale.

Ce programme général s'appuie sur l'étude des grands fleuves et se propose de comprendre l'organisation des réseaux hydrographiques, d'établir le bilan de l'érosion des continents, de quantifier l'apport à l'océan. Nous avons débuté ce projet par l'étude du fleuve Congo (3 missions), de l'Amazone (1 mission), afin d'étudier des régions en domaine équatorial peu influencées par les activités humaines pour les deux premières régions.

En amont de la quantification de l'érosion, nous avons porté notre effort sur la recherche

1) du bilan des apports atmosphériques  
2) de la cause des variations de concentrations des éléments traces et majeurs de la fraction dissoute et particulaire.

3) de la variabilité mensuelle permettant l'établissement d'un bilan exact mais aussi permettant de connaître le mécanisme et les lieux (roches fraîches, sols, etc....) où se produit cette érosion.

### Bilan des apports atmosphériques

Afin d'étudier les apports atmosphériques, nous avons effectué des mesures dans les pluies et les aérosols des éléments majeurs (Na, Mg, Ca, K), mais aussi les isotopes du Sr.

Les points importants qui ressortent de cette étude sont que, dans ces régions du monde (Amazonie, Congo) le problème des corrections atmosphériques n'est pas résolu. Ce sont des régions où les rivières peuvent avoir des concentrations d'éléments très faibles. De ce fait, nous pouvons montrer que pour certains éléments, il peut y avoir jusqu'à 80 % d'apports atmosphériques. De plus, nous avons démontré que ces corrections dépendaient d'un certain nombre d'hypothèses sur l'origine des éléments (marine, provenant du bassin lui-même ou provenant de bassin extérieur au bassin de drainage des rivières). En utilisant comme contraintes les isotopes du Sr et les concentrations des éléments traces dans les pluies, nous démontrons que l'hypothèse d'apport de Sr marin et du bassin lui-même n'est pas vérifiée. Le résultat est important puisqu'il démontre que les corrections des apports atmosphériques effectuées classiquement par référence aux rapports marins ne sont

pas justifiées. La correction effectuée à partir des rapports marins sous estime les apports de Ca, Sr et Mg.

#### Variation de la concentration dans le dissous et le particulaire

Les phases dissoutes et particulaires sont séparées par une filtration à 0,2 micron. La phase sableuse est prélevée directement au fond de la rivière.

Nous avons mesuré la concentration de 20 éléments au moyen de l'activation neutronique.

##### a) Dissous

Nous avons trouvé par l'étude de la phase dissoute deux résultats principaux. Le premier est la mise en évidence d'un nombre limité d'éléments solubles. La présence de Th, Hf, Zr, Ta et La par exemple dans cette fraction est due à la présence de 10-6 gr. à 10-7 gr/l de phase équivalente au particulaire. Ceci est interprété par le fait que la filtration à 0,2 micron laisse passer des particules plus petites. Le deuxième résultat est la confirmation que l'abondance d'éléments solubles reflète la géologie des terrains rencontrés (calcaire, granite, évaporite etc...). A partir de relation très simple observée entre le rapport de différents cations dissous nous pouvons montrer que l'ensemble des variations chimiques observées s'explique par la contribution de deux types de roches les silicates et les carbonates. Cette observation permet alors de déterminer dans chacun des différents affluents étudiés la contribution pour chacun des éléments de ce qui est apporté par la pluie, par les carbonates et par les silicates

##### b) Particulaire

Les variations de concentration en divers éléments du particulaire peuvent être reliées à cinq grandes observations :

- 1) La variation de rapports de concentration d'éléments insolubles dans le particulaire est corrélée avec l'âge moyen du bassin versant. Cette observation est à rattacher à l'observation de Taylor et Mac Lennan. Ces auteurs montrent que la composition moyenne de la croûte continentale est variable au cours du temps.
- 2) La valeur absolue de la concentration des éléments traces et majeurs est directement reliée à la quantité de matière en suspension (MES). Plus la quantité de MES est faible, plus la concentration des éléments est faible. Cette observation est à rapprocher de l'observation que plus les MES sont faibles, plus le pourcentage de matière organique est élevé. Cette matière organique ne contenant que peu d'éléments à l'exception du Fe, Co et Ni, sa présence équivaut à une dilution.
- 3) Par rapport à l'abondance crustale moyenne, certains éléments montrent un très fort appauvrissement dans la phase particulaire (U, K, Sr, Na, Ca, Mg). La perte d'éléments solubles s'explique par le simple fait que ces éléments sont aussi transportés par la fraction soluble.
- 4) Entre les deux grands bassins Congo et Amazone, on observe des similitudes de concentration très importante pour tous les éléments. Le zirconium et l'Hafnium

sont sous-abondant dans cette fraction particulaire par rapport à la moyenne de la croûte continentale, mais cette sous-abondance ne peut être expliquée de la même manière que précédemment du fait que ces éléments sont insolubles.

#### c) Sable

Nous avons mesuré la concentration des divers éléments sur 15 échantillons de sable prélevés au fond des rivières du bassin du Congo. Si l'on compare ces concentrations aux concentrations du particulaire, on observe que 2 éléments sont très abondants, le Zr et l'Hf. Ceci est dû au fait que ces sables sont principalement composés de quartz et de minéraux lourds (Zircon).

La première observation simple qui relie les concentrations de ces trois phases (particulaire en suspension, sables transportés par le fond, fraction liquide), c'est le concept de complémentarité.

On peut expliquer l'ensemble des concentrations en supposant qu'à partir d'une croûte continentale silicatée moyenne, les éléments vont se trouver transportés dans l'océan de manière différente suivant leur comportement.

Les éléments insolubles, à l'exception de l'Hf et Zr vont être transportés uniquement par les particules en suspension. Les éléments insolubles Hf et Zr sont transportés à la fois par les sables et à la fois par les particules en suspension. Les éléments solubles, eux par contre, sont transportés par les particules et par la fraction liquide.

Cette observation permet, en supposant une croûte silicatée moyenne homogène, d'effectuer des bilans chimiques d'altération à partir des seules valeurs de concentration. Il est possible de déterminer la quantité de particulaire érodé. Les résultats obtenus par cette méthode sur les échantillons des affluents du Congo et de l'Amazone sont de même ordre de grandeur que les résultats obtenus par les méthodes de pesée des filtres. Ces résultats montreraient que nous sommes dans le cas du Congo en équilibre d'érosion. De plus il est alors possible pour chaque affluent de déterminer le rapport érosion chimique, érosion mécanique uniquement sur l'érosion des terrains silicatés.

#### Variabilité mensuelle

Nous avons effectué l'étude de la variabilité mensuelle de concentrations à Bangui sur l'Oubangui et à Brazzaville sur le Congo et nous avons aussi effectué des prélèvements à basse eau et haute eau de nombreuses rivières du Bassin du Congo. Nous observons des variations de concentrations des éléments dissous ainsi que des variations de compositions isotopiques dans le dissous et le particulaire. Ce type d'étude permet de cerner les mécanismes de l'érosion avec la mise en évidence par exemple d'une augmentation de l'altération des terrains silicatés par le biais de l'érosion des sols par rapport aux terrains carbonatés lors de la saison humide.

## FLUX DE CO<sub>2</sub> CONSOMME PAR EROSION CHIMIQUE SUR LE BASSIN VERSANT DU FLEUVE CONGO

J.L. PROBST et P. AMIOTTE-SUCHET  
Centre de Géochimie de la Surface (UPR CNRS n° 6251)

Les mesures mensuelles des différents paramètres physico-chimiques qui sont effectuées sur le Congo à Brazzaville et sur l'Oubangui à Bangui depuis 1987 dans le cadre du programme PIRAT/GBF puis PEGI/GBF nous ont permis notamment d'estimer avec précision les transports fluviaux d'éléments majeurs dissous (NKOUNKOU et al., 1990; PROBST et al., 1992). Les eaux du Congo et de l'Oubangui sont principalement composées de silice et de bicarbonates. Le cation dominant est le calcium, suivi du sodium.

Les flux de bicarbonates sont relativement conservatifs au cours de leur transfert dans le fleuve d'amont en aval (PROBST et al., 1993). Ces flux de bicarbonates ont deux principales sources : les ions carbonates des roches, libérés en solution lors de la dissolution des minéraux et le CO<sub>2</sub> atmosphérique/biogénique utilisé par l'altération chimique pour dissoudre ou hydrolyser les minéraux des roches carbonatées et silicatées. La contribution du CO<sub>2</sub> atmosphérique au flux total de bicarbonates exportés par le fleuve varie suivant la proportion de roches carbonatées sur le bassin versant (PROBST et al., 1993). Cette contribution a pu être estimée par modélisation géochimique à partir des flux d'éléments majeurs dissous exportés par le fleuve après correction des apports atmosphériques d'ions. Les flux spécifiques de CO<sub>2</sub> ainsi calculés sont de  $0,526 \times 10^5$  moles/km<sup>2</sup>.an et  $0,741 \times 10^5$  moles/km<sup>2</sup>.an respectivement pour le Congo et l'Oubangui, ce qui représente dans les deux cas 75% environ du flux total de bicarbonates exportés par le cours d'eau.

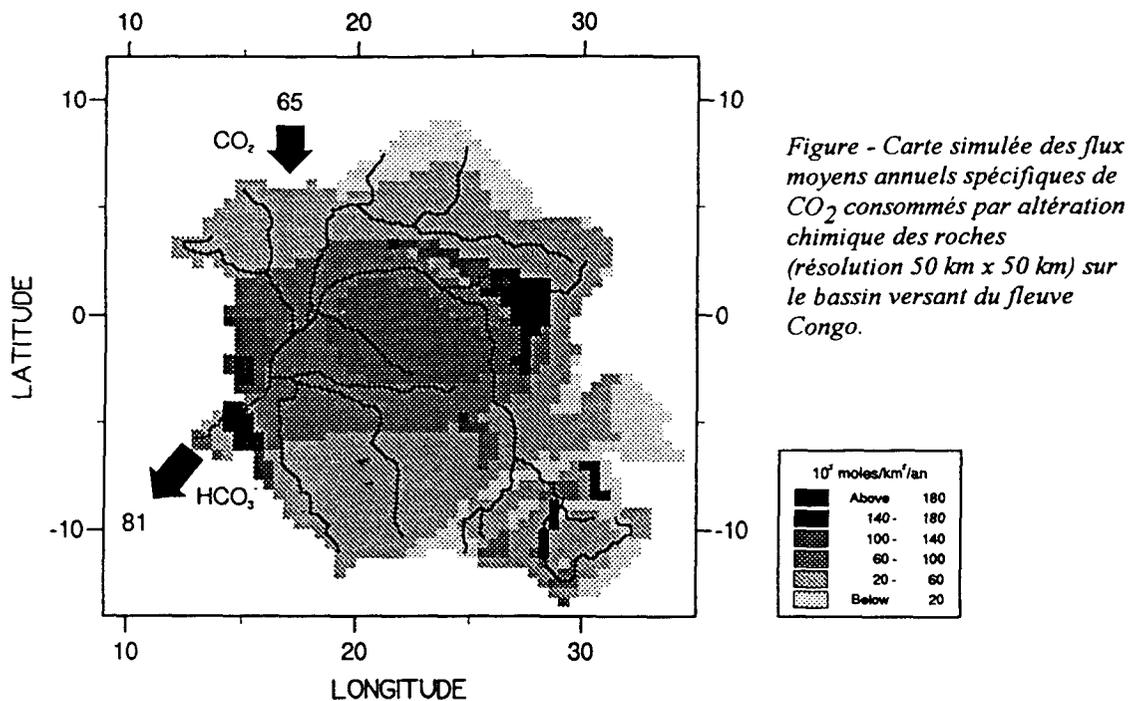
On a pu aussi calculer pour chaque bassin les quantités de CO<sub>2</sub> consommées par l'altération des différents minéraux (tableau).

*Tableau- Bilan du CO<sub>2</sub> consommé par l'altération de chaque minéral sur les bassins versants du Congo et de l'Oubangui*

Minéral source	10 <sup>9</sup> moles/an minéral dissous		10 <sup>9</sup> moles/an CO <sub>2</sub>	
	Congo	Oubangui	Congo	Oubangui
Na - silicates	66	5	66	5
K - silicates	39	3	39	3
Mg - silicates	49	4	98	8
Ca - silicates	13	2	26	4
<i>Total Silicates</i>	-	-	229	20
Mg - carbonates	13	1	13	1
Ca - carbonates	52	4	52	4
<i>Total carbonates</i>	-	-	65	5
<i>Total altération</i>	-	-	294	25

Les calculs par minéraux font apparaître sur le Congo une alcalinité totale ( $359 \times 10^9$  moles/an) plus forte que l'alcalinité mesurée ( $267 \times 10^9$  moles/an). Cette différence est à mettre en relation avec le déficit de charges anioniques mesurées qui représente en moyenne 22% (PROBST et al., 1992), soit 30% après correction des apports atmosphériques, et qui pourrait être attribué à des anions organiques. Si l'on tient compte de ce déficit, la contribution du CO<sub>2</sub> atmosphérique serait alors supérieure et représenterait 82% du flux total d'alcalinité.

Un modèle proposé par AMIOTTE-SUCHET et PROBST (1993a) a pu être appliqué au bassin versant du Congo (AMIOTTE-SUCHET et PROBST, 1993b) pour calculer les flux de CO<sub>2</sub> consommés par l'érosion chimique des roches par maille de 50 km x 50 km (figure) en tenant compte pour chaque maille de l'intensité du drainage et de la lithologie dominante.



Les résultats obtenus montrent de fortes consommations de  $CO_2$  aux latitudes équatoriales, consommations qui diminuent en allant vers le Nord et vers le Sud du bassin, à l'exception des régions carbonatées du Sud-Est. Ces flux de  $CO_2$  varient de 14 à  $400 \times 10^3$  moles/km<sup>2</sup>.an et ils sont estimés en moyenne à  $65 \times 10^3$  moles/km<sup>2</sup>.an pour l'ensemble du bassin et pour un drainage moyen annuel de 370 mm. Cette valeur est légèrement plus forte que celle obtenue par PROBST et al. (1993) pour un drainage moyen plus faible (355 mm). Néanmoins, la modélisation proposée par AMIOTTE-SUCHET et PROBST (1993 a et b) ne prend en compte que l'altération des roches et non celle des formations superficielles appauvries en minéraux altérables.

## Références

- AMIOTTE-SUCHET P., PROBST J.L. (1993 a) - Flux de  $CO_2$  consommé par altération chimique continentale: influences du drainage et de la lithologie. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 317, Série II, p. 615-622.
- AMIOTTE-SUCHET P., PROBST J.L. (1993 b) - Modelling of atmospheric  $CO_2$  consumption by chemical weathering of rocks: application to Garonne, Congo and Amazon basins. *Chemical Geology*, 107, p.1-6.
- NKOUNKOU R.R., KREMPP G. et PROBST J.L. (1990) - Géochimie et hydrologie des eaux de surface : exemple du bassin du fleuve Congo. *C.R. Journées Laboratoires ORSTOM*, 18-20 Septembre 1990, p. 25-36.
- PROBST J.L., NKOUNKOU R.R., KREMPP G., BRICQUET J.P., THIEBAUX J.P. et OLIVRY J.C. (1992) - Dissolved major elements exported by the Congo and the Ubangui rivers during the period 1987-1989. *Journal of Hydrology*, 135, p. 237-257.
- PROBST J.L., MORTATTI J. et TARDY Y. (1993) - Carbon river fluxes and weathering  $CO_2$  consumption in the Congo and Amazon river basins. *Applied Geochemistry*, vol. 7, sous presse.

Colloque PEGI: GRANDS BASSINS FLUVIAUX PERIATLANTIQUES  
22-24/11/1993 - ORSTOM Paris

## CRISTALLOCHIMIE DES MATIERES MINERALES TRANSPORTEES DANS LA GEOSPHERE TROPICALE: RESULTATS PRELIMINAIRES ET PERSPECTIVES

Jean-Pierre MULLER (1)(2), Nathalie MALENGREAU (2),  
Gwenaëlle LAUQUET (2), Thierry ALLARD (2)

(1) ORSTOM, Département TOA

(2) Laboratoire de Minéralogie-Cristallographie, UA CNRS 09, IPGP,  
Universités Paris 6 et 7, Tour 16-26, 2ème étage,  
4 Place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05

Tél : (1) 44 27 52 27 -Fax : (1) 44 27 37 85 - e-mail: muller@lmcp.jussieu. fr.

La géosphère tropicale est le siège d'importants transferts et échanges de matière. Pour établir des bilans de ces transferts et échanges, et notamment évaluer les capacités exportatrices actuelles des grands bassins, il est nécessaire de déterminer la forme sous laquelle les éléments sont mobilisés, en solution ou sous forme solide. Concernant spécifiquement les phases solides, il est important de connaître en outre: (1) leur *nature*, certaines d'entre elles, très finement divisées, mal cristallisées et présentant une très grande surface spécifique et une forte réactivité de surface (oxyhydroxydes de fer et phases "amorphes", par exemple), jouant un rôle important dans le contrôle du cycle géochimique des éléments; (2) leur *stabilité*, car certains minéraux résultant de l'altération des roches peuvent subir des transformations tout au long des étapes du cycle altération-transport-sédimentation, plusieurs générations de phases minérales pouvant alors se succéder; (3) leur *origine* (sources des MES en particulier).

Une analyse minéralogique conventionnelle ne permet généralement pas d'accéder à ce type d'informations, soit en raison d'une minéralogie monotone à l'échelle des bassins versants, soit en raison de l'extrême division et des faibles concentrations de certaines phases minérales (oxyhydroxydes de fer des MES, par exemple). Des outils cristallochimiques (spectroscopies du solide) ont permis récemment d'apporter de nouvelles contraintes à la modélisation des processus de transferts et d'échanges de matière à la surface de la terre (Muller *et al.*, 1994). A titre prospectif, nous avons testé la pertinence de l'approche cristallochimique pour tracer les transferts de matière dans la géosphère tropicale.

Deux sites ont été sélectionnés pour cette étude préliminaire:

- une toposéquence de sols située au Cameroun (Goyoum): elle recoupe une couverture d'altération meuble, représentative des formations latéritiques sous forêt tropicale humide, et les sédiments d'un bas-fond
- le bassin de l'Oubangui: la nature des MES prélevés à Bangui a été comparée à celle des matériaux constitutifs d'une couverture d'altération indurée, située à l'amont du bassin (Dembia) et représentative des couvertures d'altération de ce bassin.

Les matériaux analysés étant essentiellement constitués de kaolinite et d'oxyhydroxydes de fer, deux méthodes ont été privilégiées: (1) la *résonance paramagnétique électronique*: cette méthode permet de localiser, dans le réseau de la kaolinite, différents éléments traces et des dégâts d'irradiation, qui sont autant de "stigmates" permettant de remonter aux conditions et milieux de formation et d'évolution des kaolinites (Muller et Calas, 1993); (2) la *spectrométrie optique en réflectance diffuse*: cette méthode permet d'analyser la spéciation du fer dans les matériaux argileux et de distinguer, notamment, les phases ferrifères cogénétiques de la kaolinite de celles qui sont postérieures à la formation de ce minéral argileux (Malengreau *et al.*, 1994).

Plusieurs enseignements sont tirés de cette étude préliminaire:

- Concernant les couvertures d'altération (Goyoum, Dembia): la comparaison des signatures spectrales des matériaux constitutifs des différents compartiments de ces couvertures indique que plusieurs générations de kaolinites peuvent être distinguées par leurs caractéristiques cristallographiques. Une nette distinction est faite entre: (1) les kaolinites des matériaux ferrugineux indurés (nodules, cuirasses) et celles des matériaux meubles (altérations basales, matériaux argileux meubles de surface); (2) les kaolinites de la base des couvertures d'altération, baignée par les nappes phréatiques qui alimentent le réseau hydrographique, et celles de la partie supérieure de ces couvertures, qui sont soumises à une érosion mécanique. Ces signatures spectrales permettent en outre d'utiliser la kaolinite comme traceur sensible des événements géochimiques qui ont marqué l'histoire de ces couvertures: ce minéral apparaît relativement stable et capable de "mémoriser" d'anciennes conditions d'altération.

- Concernant les sédiments de bas-fond (Goyoum): les caractéristiques cristallographiques des kaolinites permettent d'envisager qu'elles sont détritiques, c'est à dire qu'elles ne se sont pas formées dans les conditions d'hydromorphie permanente qui caractérisent les milieux où elles sont actuellement accumulées.

- Concernant les MES (Oubangui à Bangui): pour la première fois, il a été possible d'identifier les oxyhydroxydes de fer associés aux kaolinites, d'apprécier leur concentration relative et de mettre en évidence des variations saisonnières de ces concentrations.

Ces données permettent d'émettre des hypothèses sur l'origine de matériaux transportés dans la géosphère tropicale: (1) les signatures spectrales des kaolinites de bas-fond (Goyoum) indiquent que ces kaolinites se sont formées à l'amont des paysages, se sont accumulées en bas de pente à la suite de transports particuliers, et qu'elles restent stables en conditions hydromorphes; (2) les variations saisonnières des signatures spectrales des oxyhydroxydes de fer associés aux kaolinites des MES de l'Oubangui permettent d'envisager plusieurs sources potentielles: une partie des MES pourrait provenir de la base meuble des couvertures d'altération soumise à un soutirage par les eaux de nappe.

La cristallographie des minéraux s'avère donc être un outil précieux pour tracer les transferts solides dans la géosphère tropicale. L'approche cristallographique sera couplée à diverses approches géochimiques pour analyser les mécanismes, la nature et les variations saisonnières des transferts d'éléments à l'échelle d'un petit bassin versant expérimental, et tenter d'établir un bilan de ces transferts. Des développements techniques, permettant l'étude de la fraction colloïdale et de micro-quantités de matériaux et une quantification des paramètres cristallographiques, sont envisagés.

#### Références:

- MALENGREAU, N., MULLER, J-P and CALAS, G. (1994) Fe-speciation in kaolins: a diffuse reflectance study. *Clays and Clay Minerals* (sous presse).
- MULLER, J.P. and CALAS, G. (1993) Genetic significance of paramagnetic centers in kaolinites. In *Kaolin Genesis and Utilization*, H. H. Murray, W. Bundy and C. Harvey, eds. The Clay Minerals Society of America, Boulder, Colorado, 261-290.
- MULLER, J.P., MANCEAU, A., HAZEMANN, J. L., ALLARD, T., ILDEFONSE, P. and CALAS, G. (1994) Crystal chemistry of clays and associated oxides: constraints for modelling element transfer at the Earth's surface. *American Journal of Science* (accepté)

BIOGEOCHIMIE DE LA MATIERE ORGANIQUE DES SUSPENSIONS  
DU CONGO ET DE SES AFFLUENTS.

SCRIBE P.(1), BARREAU Ch. (1), DAGAUT J. (1),  
SALLOT A. (1), PEPE C. (2), BRICQUET J.P. (3).

(1) Laboratoire de Physique et Chimie Marine - Université Pierre et Marie Curie - CNRS UA 353.

(2) Laboratoire de Spectrochimie Moléculaire - Université Pierre et Marie Curie.

(3) Mission ORSTOM - Brazzaville.

L'objectif du groupe de biogéochimie de la matière organique des fleuves tropicaux a été de mettre en place dans le cadre du programme PEGI et du thème "Grands Bassins Fluviaux" une stratégie d'analyse et d'échantillonnage permettant d'apporter des informations précises sur l'origine (allochtone/autochtone) et l'état de dégradation de la matière organique des suspensions au cours de son transfert des sols et de la végétation au corridor fluvial.

Deux types de prélèvement ont été effectués sur le terrain: 1- un échantillonnage mensuel "lourd" de suspensions sur 200 litres d'eaux préfiltrées et centrifugées (1989-1992) à deux stations de référence (Bangui et Brazzaville) et 2- des prélèvements de particules par filtration de 10 litres d'eau sur des filtres de fibre de verre (0,7  $\mu\text{m}$ ) au cours de deux campagnes en période de hautes-eaux de l'Oubangui où il a été possible d'échantillonner une douzaine de stations (figure 1a) entre Bangui et Brazzaville sur l'axe fluvial et certains affluents en amont des confluences : Lobaye, Motoba, Sangha, Likuala, Alima et Kasai (Novembre 1989 et Novembre 1992).

Plusieurs équipes ont contribué de façon complémentaire à l'étude de la matière organique des suspensions. Tout d'abord, par une approche globale : pyrolyse Rock-Eval (P.Albéric) ; pyrolyse/GC/MS (F.Gadel) complété par s'ajouter une approche moléculaire des lignines, par oxydation cuivrique en milieu basique suivie d'une analyse des dérivés phénoliques par chromatographie en phase liquide (L. Serve), et des stérois, marqueurs des plantes cuticulaires et du phytoplancton fluvial.

Plusieurs exposés et posters présenteront au cours de ce colloque divers aspects de ces recherches; pour notre part, nous exposerons les résultats obtenus par l'analyse des stérois et des pigments chlorophylliens.

Le suivi mensuel effectué en 1989 montre à Brazzaville et à Bangui des empreintes de stérois très variables d'un mois à l'autre, où les stérois marqueurs de la végétation supérieure (campestérol, stigmastérol, sitostérol et leurs stanols correspondants) sont toujours majoritaires, indiquant une faible contribution phytoplanctonique. Ces informations sont confirmées par les résultats de la pyrolyse (Rock-Eval et GC/MS) qui montrent nettement la prédominance d'un carbone détritique une grande partie de l'année. Ces résultats sont aussi confirmés par l'analyse des pigments chlorophylliens réalisée au cours de la campagne de Novembre 1989.

Un aspect plus prospectif de la dernière campagne réside en particulier dans la distribution des stérois sur l'ensemble du système Oubangui-Congo. En effet, les

proportions relatives des stéroïdes homologues (campestérol, stigmastérol et sitostérol) associés aux particules en suspension prélevées sur l'Oubangui où le stigmastérol est nettement majoritaire (Fig.1b) et le Congo (Fig.1c) sont remarquablement stables, sauf pour la dernière station C4 en amont de Brazzaville qui semble subir nettement l'influence des suspensions du Kasai caractérisées par une prédominance marquée du stigmastérol et du sitostérol. Ces résultats posent maintenant plusieurs questions : dans quelles conditions, les stéroïdes peuvent-ils permettre une discrémiation des apports de matière organique de bassins versants différents ? pour quels types de végétation ? et à quelles échelles d'espace et de temps ?

La suite que nous souhaitons donner à cette recherche est de réaliser des études à plusieurs échelles d'espace et de temps comme actuellement sur le Duke à petite échelle (projet amazonien du versant Bolivien).

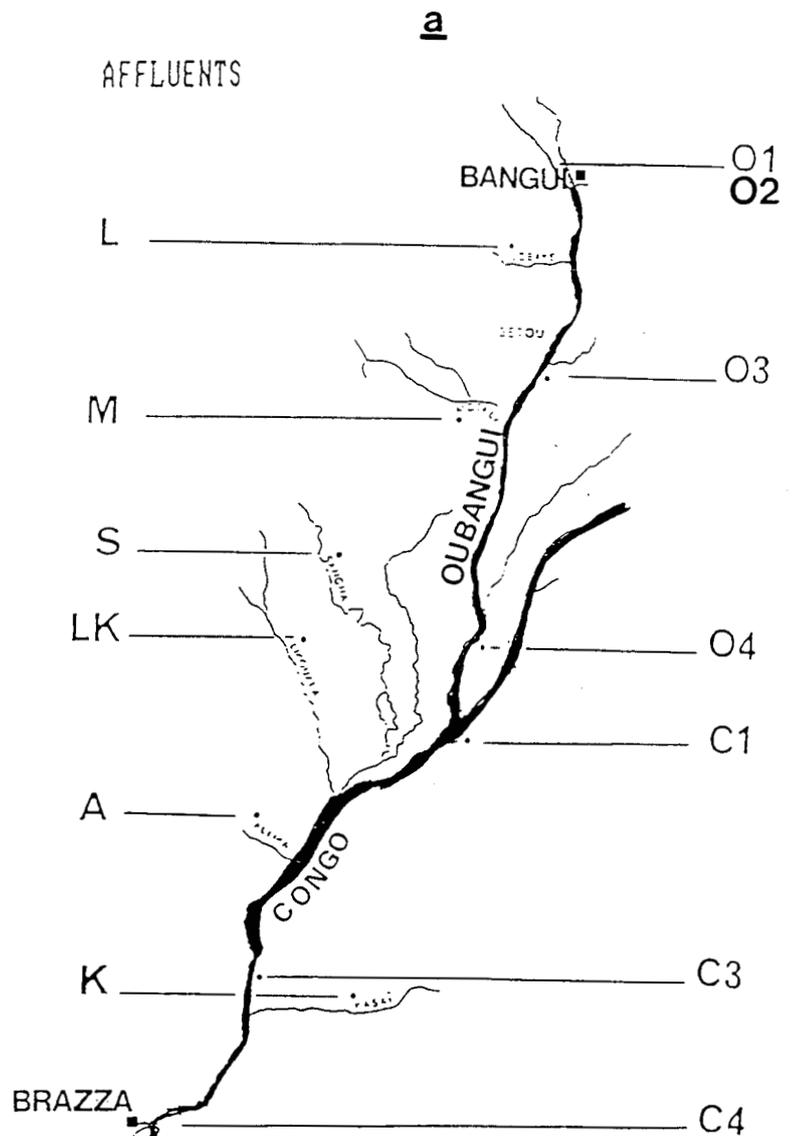
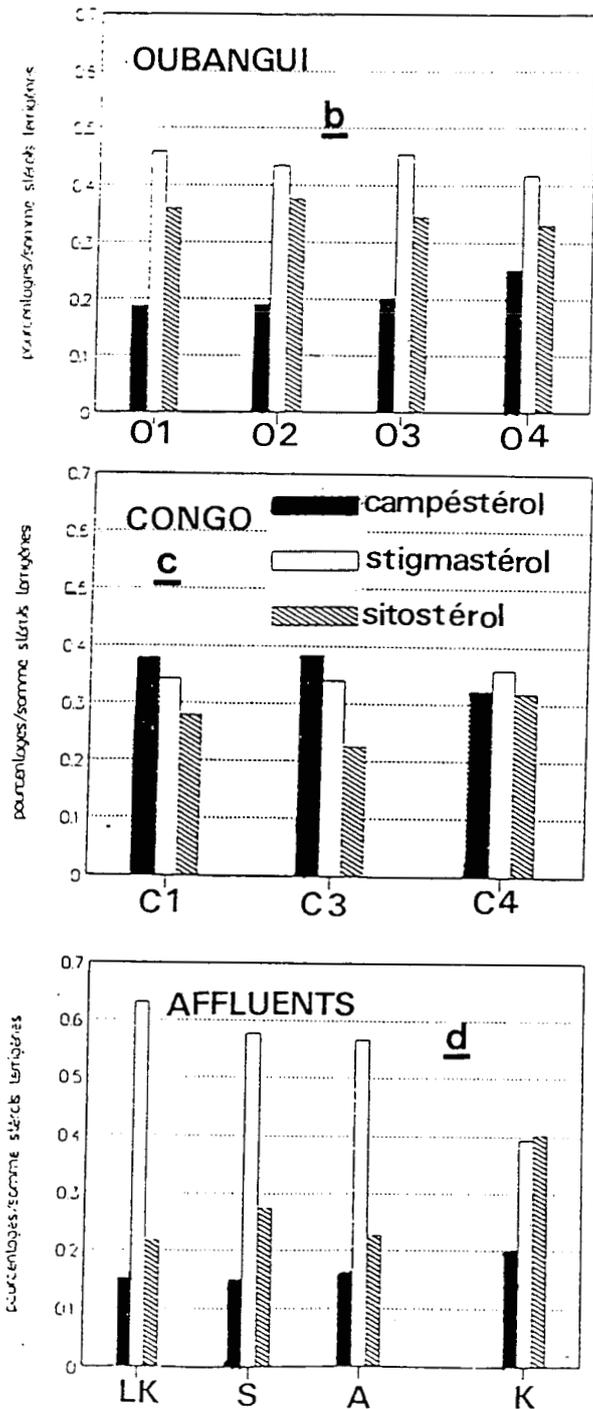


FIG.1: Sites de prélèvement au cours de la mission Oubangui- Congo (1989)

## Caractérisation chimique de la fraction organique des suspensions du fleuve Congo.

F. Gadel\*, L. Serve\*\* et A. Bruchet\*\*\*

\* Laboratoire de Sédimentologie et Géochimie Marines, CNRS, URA 715, Université de Perpignan, 52, Avenue de Villeneuve, 66860 Perpignan Cedex.

\*\* Laboratoire de Biologie végétale, Université de Perpignan, 52, Avenue de Villeneuve, 66860 Perpignan Cedex.

\*\*\* Laboratoire Central, Lyonnaise des Eaux, 78230 Le Pecq.

### INTRODUCTION:

L'objectif du groupe de Géochimie Organique a été d'étudier la matière organique associée aux suspensions du fleuve Congo prélevées à Brazzaville. Les études ont porté sur l'évaluation quantitative de la matière organique couplée à son analyse qualitative afin de reconnaître sa distribution, l'origine autochtone ou allochtone du matériel et l'influence des conditions de milieu liées au régime du fleuve.

L'analyse du carbone organique particulaire (COP) a donc été associée à l'analyse des polysaccharides par colorimétrie, des composés phénoliques par CLHP et à l'analyse de la suspension par pyrolyse-chromatographie en phase gazeuse-spectrométrie de masse.

Plusieurs campagnes de prélèvement (séries quelquefois incomplètes) se sont déroulées en 1987, 88 et 89. Le matériel en suspension a été séparé par centrifugation, puis lyophilisé.

### RESULTATS:

Durant 1987 les teneurs en COP, élevées dans la fraction  $< 50 \mu\text{m}$  en début d'année, décroissent ensuite (Fig. 1).

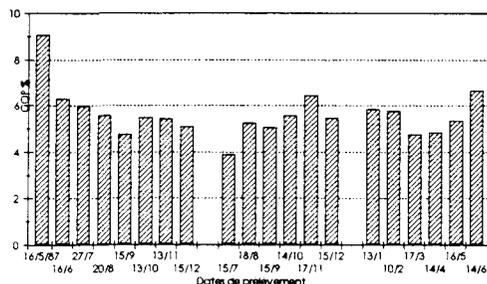


Fig. 1 - Teneurs en carbone organique particulaire (COP) dans les suspensions du Congo. Evolution saisonnière.

En fin d'année, période de crue, une dilution par la charge minérale paraît survenir. Dans la fraction  $> 50 \mu\text{m}$  l'évolution est assez voisine, mais les valeurs, supérieures, dénotent l'abondance

des débris végétaux. En 1988 (juillet à décembre), l'évolution n'est pas régulière, mais les valeurs s'accroissent en fin d'année. Enfin, en 1989 (janvier à juin), les teneurs diminuent en mars-avril. D'une année sur l'autre, les teneurs demeurent donc assez variables.

En 1987, les teneurs en polysaccharides (mg/g) sont supérieures dans la fraction  $< 50 \mu\text{m}$  comparativement à la fraction  $> 50 \mu\text{m}$ .

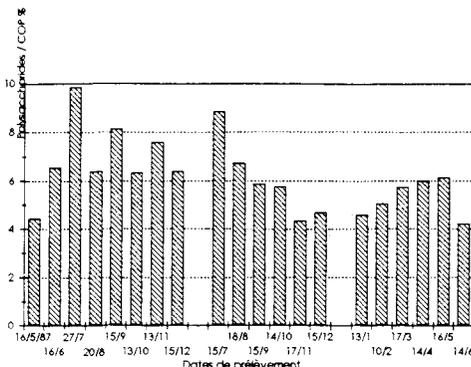


Fig. 2 - Pourcentages de carbone polysaccharidique rapportés au carbone organique particulaire.

Dans la première fraction elles sont par ailleurs plus élevées en 1987. Une baisse des valeurs intervient en fin d'année en 1987 et 1988. Cette évolution est

également sensible sur le graphique représentant les pourcentages de carbone polysaccharidique rapporté au COP (Fig. 2)

L'analyse des *composés phénoliques* a été réalisée afin de reconnaître l'origine des apports végétaux (forêt-savane) en fonction du régime du fleuve et leur degré de dégradation : composés labiles ou difficilement dégradables (lignines) (Fig.3).

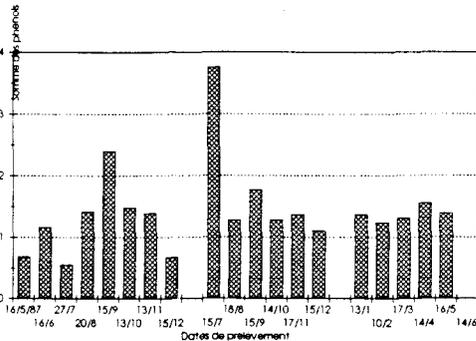


Fig. 3 - Pourcentages de composés phénoliques rapportés au carbone organique particulaire.

En effet certains composés phénoliques peuvent quelquefois indiquer une couverture végétale à dominante de Graminées comme l'acide férulique. Les crues montrent un accroissement des formes

acides par rapport aux formes aldéhydes, en relation avec le degré de transformation de ces composés présents dans les substances humiques issues des bassins versants. A l'étiage, certains composés largement majoritaires (pOH benzoïques) peuvent être des indicateurs de l'importance de l'activité phytoplanctonique en relation avec l'absence relative d'apports à partir des bassins versants.

L'analyse par pyrolyse qui permet de déterminer l'importance des *classes principales de composés organiques* (hydrocarbures aromatiques, composés azotés, sucres, phénols et sucres aminés) montre des différences en 1987-88 entre les mois de juin-juillet-août et les mois de septembre-octobre-novembre. La première période (étiage) voit un accroissement des hydrocarbures aromatiques et une baisse des composés azotés qui peuvent souligner l'état dégradé de la matière organique. La relative abondance de l'acide crotonique témoignerait de l'activité bactérienne en cette période d'étiage. Durant la deuxième période (crues) un enrichissement en phénols et en composés azotés (acétonitrile, indol) se manifeste, plus accentué encore en septembre, qui soulignerait un caractère plus frais du matériel apporté de l'amont par les crues. Ces évolutions saisonnières sont bien mises en évidence par le traitement des données (AFC) qui montre bien les différences de composition de la matière organique qui surviennent en périodes de crue et d'étiage.

#### CONCLUSIONS:

L'évaluation quantitative de la matière organique couplée à la connaissance de sa nature par l'application de diverses techniques analytiques permet de préciser l'origine du matériel en suspension et l'influence des conditions de milieu variables au cours des saisons.

Si des variations se manifestent entre les mois d'étiage et de crue au niveau de la composition globale de la matière organique, dans le détail, les teneurs sont très variables d'une année sur l'autre. Les pulsations saisonnières des apports organiques du fleuve et de ses affluents se marquent assez bien au niveau de la distribution des phénols, des composés azotés et des sucres comme marqueurs d'origine et d'autres composés individuels comme l'indol ou l'acide crotonique pour l'état de dégradation de la matière organique et de l'activité bactérienne.

Les méthodes d'analyse appliquées apportent des informations complémentaires. Des prélèvements plus nombreux auraient certainement permis une interprétation plus fidèle des processus successifs liés au régime du fleuve.

Colloque "Grands Bassins Fluviaux peri atlantiques" Paris. 22-24/11/93

TRANSPORT ET DEPOT DE L'OR DANS LE BASSIN DE L'OUBANGUI-ZAIRE

J. Boulègue\*, I. Verhaeghe\*, M. Benedetti\*\*

\* Lab. Géochimie et Métallogénie - CNRS-UPMC.

Boîte Courrier 124. 4, place Jussieu. 75252 Paris Cédex 05.

\*\* Lab. Géosciences de l'Environnement . CNRS URA 132. Univ. Aix Marseille III.

Case 431. Campus Saint Jérôme. 13397 Marseille Cedex 20.

L'or dissous et l'or en suspension ont été mesurés à l'issue de deux campagnes d'échantillonnage faites en 1988 et 1989. Les concentrations obtenues sont très variables (4 à 880 pM/l pour Au dissous; 2 à 6 pM/l pour l'or en suspension). Les valeurs les plus élevées de Au dissous sont observées après la confluence Oubangui-Zaïre et la confluence Kasai-Zaïre lors d'une période de crue exceptionnelle (novembre 1988).

A l'aval de Brazzaville les concentrations sont de l'ordre de 10pM/l pour Au dissous et 9 pM/l pour Au en suspension.

Les concentrations en or dissous s'accroissent lors des périodes de crues. Nous pensons que cet effet est attribuable à une interaction de l'eau avec les systèmes biologiques. En particulier cet effet est notable dans les plaines inondables, c'est à dire dans la région du Giri et celle du Kasai.

Les flux mesurés lors de l'échantillonnage de 1989 sont présentés en figure 1.

Les résultats obtenus montrent que l'apport total en or du bassin du Congo vers l'Atlantique (sous forme dissoute et en suspension) est de l'ordre de 6 tonnes/an. Cette quantité faible au regard des transferts intrabassinaux est néanmoins dix fois plus forte que les apports hydrothermaux océaniques dans l'ensemble des océans.

#### Références

Benedetti M. (1990) Géochimie de l'or : mécanismes de transport et de dépôt. Thèse doctorat Université Paris 7. 197 pp.

Benedetti M., Boulègue J. (1990) Transfer and deposition of gold in the Congo watershed. Earth Planet. Sci. Lett., 100, 108-117.

Rémi B., Verhaeghe I., Mauchien P. (1991) Real sample analysis by ETA-LEAFS with background correction : application to gold determination in river water. Applied Spectrosc., 44, 19-24.

Verhaeghe I. (1991) Comportement de l'or et de l'iridium dans les environnements de surface. Thèse doctorat Université Paris 7. 148 pp.

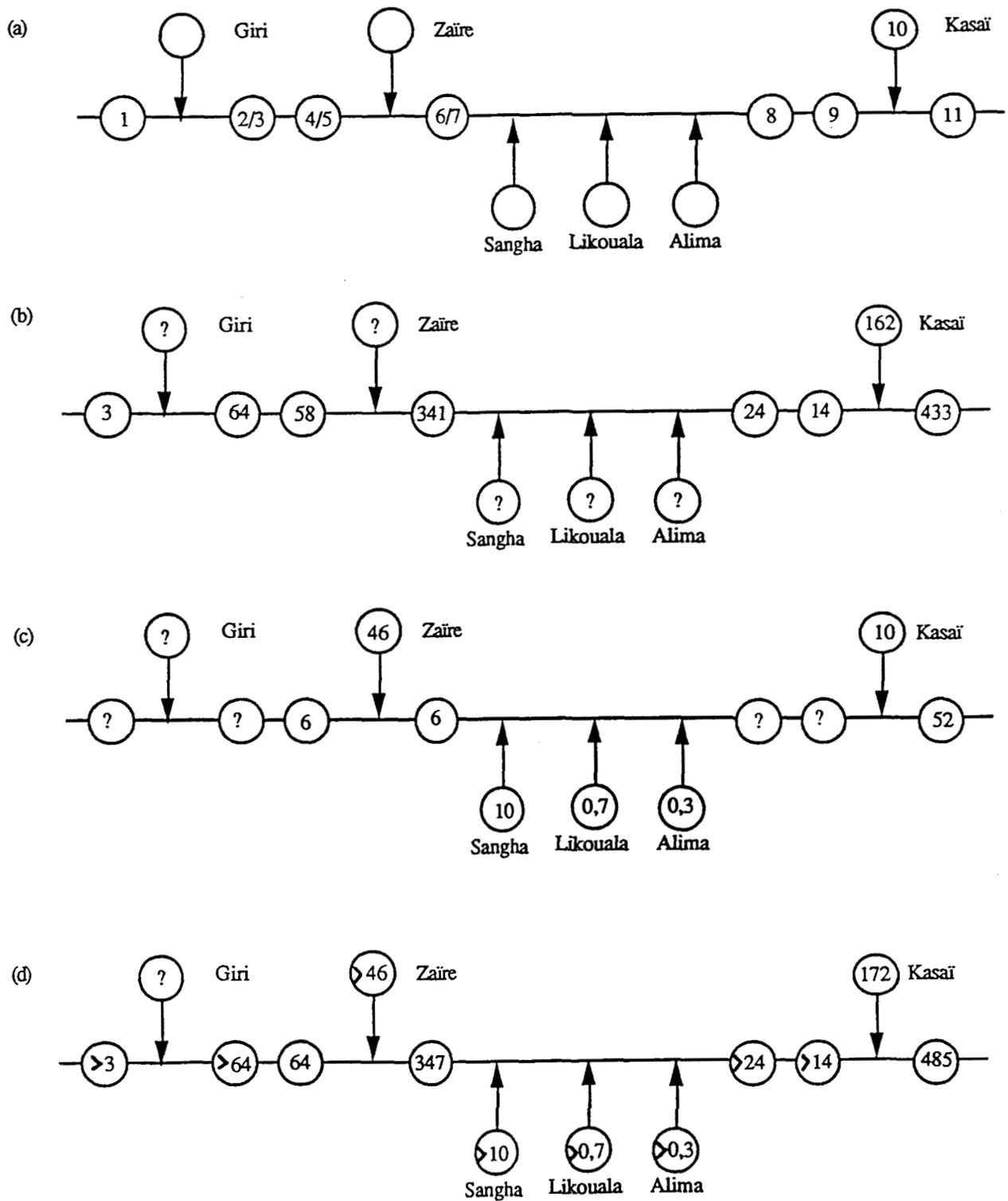


Figure n°1 : Flux d'or le long de l'Oubangui et du Congo exprimé en  $10^{-5}$  molls  
 (a) numéros des échantillons, (b) flux d'or dissous, (c) flux d'or particulaire, (d) flux d'or total

## Chimie du fleuve Congo à Brazzaville

F. Sondag, ORSTOM - Bondy

L'étude des variations de la matière minérale dissoute à Brazzaville a porté sur les années 1988 à 1992, soit cinq années complètes. Les données de 1987 sont moins fiables sur le plan analytique pour plusieurs éléments.

Les variations des éléments majeurs sont toujours qualitativement anti-corrélés avec le débit. Ce fait est surtout remarquable pour les bicarbonates qui, avec une concentration moyenne de  $\pm 15 \text{ mg l}^{-1}$ , représentent l'anion dominant. Les sulfates et chlorures sont moins abondants ( $\pm 2 \text{ mg l}^{-1}$ ) alors que les nitrates sont en général non significatifs, sauf dans quelques prélèvements qui pourraient correspondre à des épisodes de nitrification ponctuelle. Pour ce qui est des cations, on observe des concentrations pratiquement équivalentes en Ca, Mg, Na et K, entre 2 et  $2,5 \text{ mg l}^{-1}$  en moyenne. La silice varie beaucoup moins que les autres éléments minéraux; son coefficient de variation est de seulement 8%. Les autres ions ont un coefficient de variation compris entre 20 et 30 % alors que les débits varient de plus de 100 %. La dilution des concentrations en fonction du débit n'est donc pas le seul phénomène à prendre en compte pour expliquer les variations de teneurs.

Les diagrammes ternaires font bien ressortir la stabilité de la composition des eaux du Congo à Brazzaville. Une comparaison avec les données de l'Oubangui à Bangui (BGP) montre que ces dernières sont plus calci-magnésiennes alors qu'à Brazzaville les eaux sont plus proches du pôle Na + K.

### Relation conductivité - concentration des majeurs

Le modèle d'interprétation de teneurs en éléments majeurs en fonction des conductivités proposé par WACKERMANN permet de lier la conductivité (S) des eaux et la concentration (C) en un élément au minéral en équilibre de dissolution ou de néoformation par la relation

$$C = b \times S^a$$

où b et a sont des constantes caractéristiques du minéral en équilibre.

Ce traitement appliqué aux eaux du Congo montre:

- un équilibre avec des plagioclases de type albite - oligoclase à Brazzaville, alors que l'on est plus proche de l'andésine ou du labrador à Bangui;
- un équilibre parfait avec le CO<sub>2</sub> atmosphérique pour les bicarbonates;
- un bon équilibre des chlorures avec la pluie continentale; dans le cas de l'Oubangui, une influence possible d'évaporites apparaît, qui pourrait être mise en relation avec des salines connues dans le haut du bassin.

## LES EXPORTATIONS DE MATIERES DU FLEUVE CONGO

**A. LARAQUE - ORSTOM - BRAZZAVILLE**  
**(COLLOQUE PEGI ; ORSTOM PARIS ; 22 - 24 NOVEMBRE 1993)**

### RESUME

Le programme PEGI (Programme d'étude de l'environnement et de la géosphère intertropicale) a pour objectif d'étudier la dynamique des écosystèmes forestiers intertropicaux.

Il associe la collaboration de l'INSU-CNRS et ORSTOM (1).

Six années d'observations régulières au pas de temps mensuel (1987-92) ont portées sur les transports solides et dissous du fleuve Congo qui est le 2ème de la planète après l'amazone avec un module interannuel de  $40\,600\text{ m}^3/\text{s}$  et une longueur de 4700 km pour un bassin versant de  $3,6 \times 10^6\text{ km}^2$ . Son régime hydrologique étudié depuis le début du siècle est bimodal.

Durant cette période d'étude, ce fleuve a exporté en moyenne interannuelle  $91,8 \times 10^6$  tonnes de matière, dont  $7,9 \times 10^6$  tonnes de sables,  $22,8 \times 10^6$  tonnes de matière en suspension (MES) et  $61,1 \times 10^6$  tonnes de matière dissoute.

6 % des MES sont constituées par de la matière organique particulaire (COP) et la matière dissoute totale contient 29,46 % de matière organique contre 70,54 % de matière minérale.

La concentration interannuelle moyenne de ces transports (76,2 mg/l) est faible par rapport à celle des grands fleuves de la planète.

Les variations saisonnières et interannuelles des concentrations de matière et des débits n'exèdent pas respectivement 14% et 28%, soulignant ainsi une grande régularité des régimes d'exportations solides et liquides.

Cependant l'étude plus fine des variations de chaque catégorie de matière transportée aide à mieux comprendre le fonctionnement de cet écosystème.

La contribution du Congo, représente 38% des apports hydriques de l'Afrique à l'Océan Atlantique, 40% des apports dissous mais seulement 7% des apports en suspension.

Ses eaux, peu minéralisées (36,35 mg/l) ont un faciès géochimique bicarbonaté mixte. 26% de la matière minérale dissoute est constituée de silice.

L'exportation spécifique totale de matière avec une moyenne de  $26,3\text{ tonnes}/\text{km}^2/\text{an}$  est stable d'une année à l'autre (variation interannuelle : 1,20). Les variations interannuelles des exportations solides et dissoutes sont identiques.

C'est l'**altération chimique**, constante d'une année à l'autre (rapport des extrêmes = 1,14) qui domine avec  $12,1\text{ t}/\text{km}^2/\text{an}$  d'éléments mis en solution sur l'érosion mécanique. Viennent ensuite les **exportations de matière organique** avec  $5,39\text{ t}/\text{km}^2/\text{an}$  qui varient un peu plus d'une année sur l'autre (rapport des extrêmes = 1,55).

Avec une **érosion mécanique** de  $8,8\text{ t}/\text{km}^2/\text{an}$ , le fleuve Congo vient en neuvième position parmi les grands fleuves de la planète, qui ont des valeurs bien plus élevées : Amazone (200), Gange (1500), fleuve jaune (2600), Ching (7000), ... . Au sein du continent africain, il devance seulement le Sénégal.

Son **altération biogéochimique** de  $17,5\text{ t}/\text{km}^2/\text{an}$ , le place en onzième position mondiale et en deuxième position pour l'Afrique juste après le Zambèze.

1 INSU = Institut National des Sciences de l'Univers

CNRS = Centre National de Recherche Scientifique

ORSTOM = Institut de recherche scientifique pour le développement en coopération

Cependant, les exportations spécifiques calculées ici, ne sont pas corrigées par les apports atmosphériques, dont l'influence relative est d'autant plus importante que les eaux sont peu chargées. Les valeurs d'érosion intrinsèque du bassin versant seront donc plus faibles.

Quelques corrélations significatives permettent enfin de calculer à partir du débit ou de la conductivité électrique les concentrations en matière dissoute, minérale et organique, ainsi que d'évaluer les exportations de matière à partir des volumes liquides évacués annuellement.

Dans le cadre du programme PEGI, une étude similaire vient d'être lancée sur l'Amazone en 1992 et les résultats à venir permettront de comparer le fonctionnement de ces deux écosystèmes forestiers intertropicaux situés de part et d'autre de l'Atlantique sud.

**MISE EN PLACE ET ÉVOLUTION DU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE  
DE LA PARTIE SEPTENTRIONALE DU BASSIN DU CONGO  
(République Centrafricaine, Zaïre,  
République du Congo et République du Cameroun)**

**Claude CENSIER<sup>(1)</sup>**

*(1) Centre ORSTOM de Bangui (République Centrafricaine)*

Des arguments tectoniques, sédimentologiques, lithologiques, paléogéographiques, et zoogéographiques permettent d'esquisser l'évolution du réseau hydrographique de la partie septentrionale du bassin du Congo (bassin de l'Oubangui et de la Sangha) depuis sa mise en place au début du Cénozoïque jusqu'aux temps présents.

Le bassin de la cuvette centrale du Congo a été initié au Protérozoïque supérieur par des déplacements relatifs NE-SW du bouclier du Kasai et de l'Afrique Centrale. Les structures majeures du bassin ont repris ces sutures et ces failles anciennes qui ont donc imposé la forme du réseau hydrographique actuel.

De l'Albien au Maastrichtien, tout le réseau hydrographique de la future partie septentrionale du bassin du Congo avait une direction générale comprise entre le NNW (pour la région occidentale) et le NNE (pour la région orientale), avec un déversement dans les fossés de Baké-Birao (République Centrafricaine), de Doba (Tchad) et le bassin de Touboro (Cameroun) (fig. 1).

La phase de compression qui affecte tout le Nord de l'Afrique Centrale de la fin du Crétacé au début du Cénozoïque, est à l'origine de la dorsale centrafricaine et, en conséquence, de la naissance du bassin du Chari et de la partie septentrionale du bassin du Congo ; parallèlement, un bombement dans la région des grands lacs impose une orientation globale vers l'Ouest du réseau hydrographique de la partie orientale du bassin du Congo.

La mise en place de ces "deux lignes de crêtes" donne alors au réseau hydrographique l'aspect d'un large éventail dont le coeur, point de confluence des principaux cours d'eau, se situait dans la zone de la confluence actuelle de l'Oubangui et du Congo (fig. 2).

Les différents phénomènes qui ont conduit à la disposition actuelle du réseau hydrographique à partir de son aspect initial en éventail sont principalement de trois types (fig. 3) :

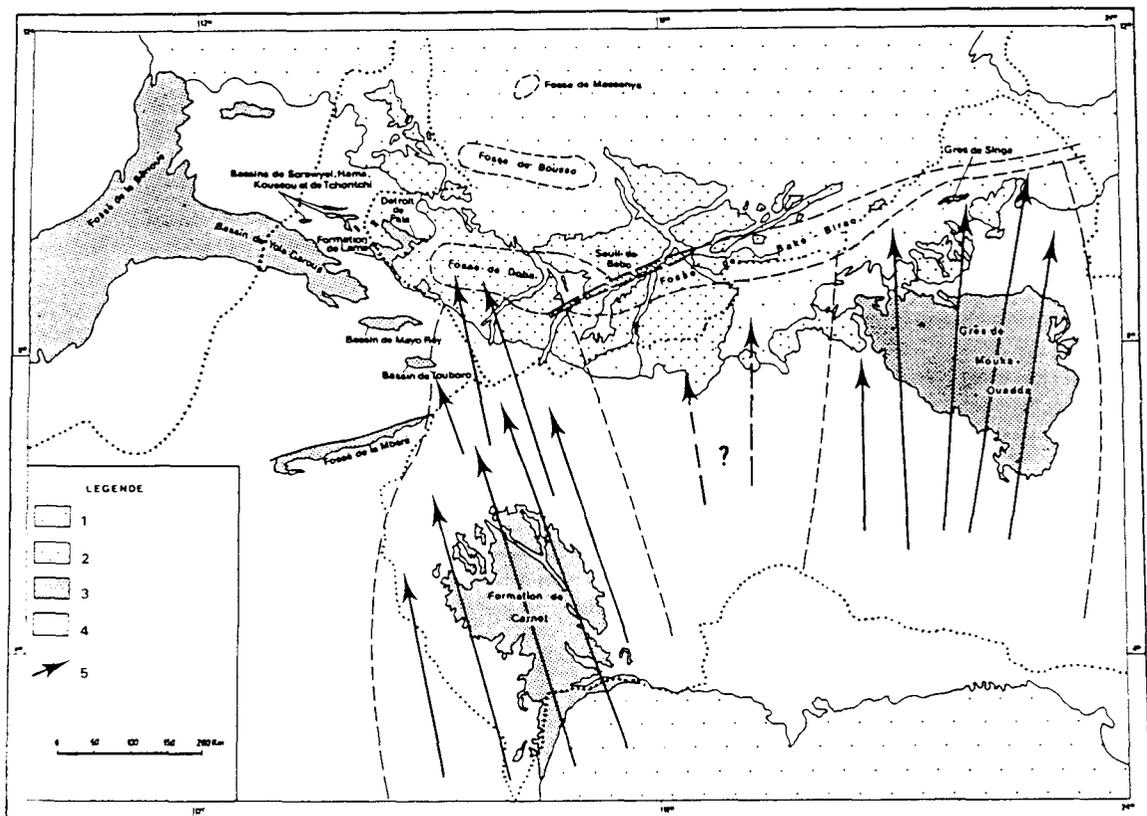
- la naissance du bassin de la Sangha est le résultat d'une déviation du cours de la pré-Mambéré vers l'Ouest et d'une capture de la pré-Boumbé I par la Mambéré ; cette déviation vient du fait que la pré-Mambéré, après avoir entaillé la Formation gréseuse mésozoïque de Carnot, a buté sur les faciès glaciogéniques de la Formation Glaciaire de la Mambéré, plus résistants à l'érosion.

- un très long bombement orienté WNW-ESE est à l'origine de la déviation de la moyenne pré-Lobaye et de la Pama vers l'est, de la capture de la Kadéi par la Mambéré, de la naissance de l'Oubangui et de l'Uélé dont la partie supérieure correspond à la partie supérieure de la pré-Itimbiri.

- tout un réseau de failles, dont certaines en extension, est à l'origine de la mise en place du Mbomou et de la déviation du cours inférieur de la Kotto, de la Bangui Ketté et de la Ouaka.

Des mouvements verticaux de la lithosphère et des rejeux de faille se sont produits dans un passé très récent ; ils ont entraîné quelques modifications localisées du réseau hydrographique (dérive occidentale du cours inférieur de la Sangha, captures au niveau d'affluents de la Kotto et du Mbari).

*glace finissant : date de mise en place carbonifère*



**Figure 1 : Disposition du réseau hydrographique dans le Nord de l'Afrique Centrale au Crétacé supérieur**

1 : formations plio-quaternaires - 2 : Continental Terminal - 3 : formations crétacées - 4 : subsidence indifférenciée - 5 : sens d'écoulement du réseau hydrographique centrafricain



## BILANS ET VARIATIONS DES FLUX DE MATIERES PARTICULAIRES ET DISSOUTES DE L'OUBANGUI A BANGUI (DE 1987 A 1992)

Didier ORANGE<sup>(1)</sup>, Jean-Claude OLIVRY<sup>(2)</sup>, Claude CENSIER<sup>(1)</sup>

*(1) Laboratoire d'Hydrologie, Centre ORSTOM de Bangui (République Centrafricaine)*

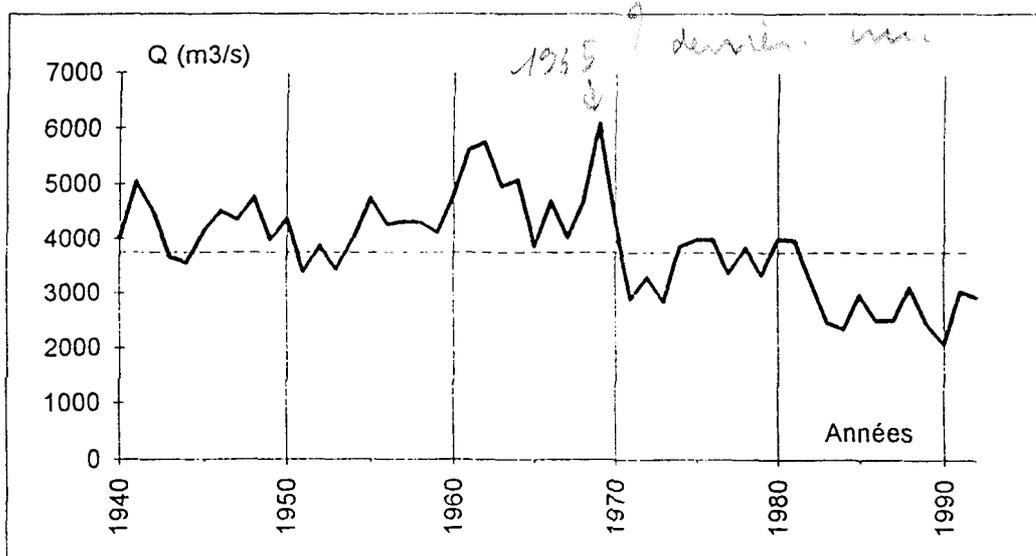
*(2) Laboratoire d'Hydrologie, Centre ORSTOM de Bamako (Mali)*

Dans le cadre du *Programme d'étude de l'Environnement de la Géosphère Intertropicale (PEGI)*, les flux de matières particulaires et dissoutes exportées par l'Oubangui sont quantifiés au niveau de Bangui depuis 1987.

Situé au coeur du continent africain, le bassin versant de l'Oubangui s'étage entre 1796 m d'altitude (source de l'Uélé) à l'extrémité orientale et 304 m à sa confluence avec le fleuve Congo. Il couvre une superficie totale de 643 900 km<sup>2</sup> ; à Bangui, sa superficie est de 488 500 km<sup>2</sup>. C'est une vaste pénéplaine modelée par les phénomènes d'érosion météorique qui se sont succédés au cours des temps phanérozoïques. Les plateaux, qui s'étagent de 500 à 800 m d'altitude, représentent 60 % de la superficie.

Le bassin versant de l'Oubangui à Bangui est entièrement constitué par le socle précambrien à l'exception des formations gréseuses mésozoïques situées au Nord. Les sols sont des sols ferrallitiques plus ou moins indurés. Enfin, la forêt dense humide semi-décidue n'occupe plus que les parties méridionales du bassin, situées sur la frontière RCA-Zaïre. Le reste du bassin est presque entièrement couvert par la savane arbustive ou arborée.

Depuis 1980, l'Oubangui est dans une phase sèche. Avant cette date, les seules années hydrologiques ayant eu un module annuel inférieur à 3000 m<sup>3</sup>/s sont 71/72 et 73/74 avec respectivement 2890 et 2750 m<sup>3</sup>/s. Par contre, depuis 1987, début de l'étude, seule 88/89 a un module annuel supérieur à 3000 m<sup>3</sup>/s, soit 3150 m<sup>3</sup>/s, les années 91/92 et 92/93 étant sensiblement égales avec 3045 et 3025 m<sup>3</sup>/s.



*Débits de l'Oubangui à Bangui depuis 1940*

Cette chute de l'hydraulicité de l'Oubangui à l'échelle du siècle se traduit sur l'hydrogramme par une montée des eaux plus tardive et plus rapide, par un écrêtement de la pointe de crue et par une vidange rapide des nappes. Sur la période 1940-1979, le module moyen annuel est de  $4210 \text{ m}^3/\text{s}$  alors que sur la période d'étude 1987-1992 le module moyen annuel est de seulement  $2740 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ce module annuel représente une lame d'eau écoulée de  $173 \text{ mm}/\text{an}$ , soit un coefficient d'écoulement actuel de 12% seulement, alors qu'il était de l'ordre de 18% depuis 1940.

Il n'existe pas de relation directe entre le débit du fleuve et la concentration de ses eaux en matières en suspension : le maximum de la charge solide précède toujours le maximum des écoulements. Cette particularité du comportement des concentrations de matières en suspension a déjà été notée par de nombreux auteurs et sur d'autres cours d'eau. Tout se passe comme si trois phases à dynamique d'érosion différente se succédaient au cours de l'année hydrologique. Ainsi, le fleuve aura en début de cycle une phase d'*érosion précoce*, suivie d'une phase d'*érosion et transport* (le coeur de la saison des pluies) et enfin une phase d'*alluvionnement*. En utilisant un diagramme représentant la somme des tonnages de matières en suspension exportés en fonction de la somme du volume d'eau écoulée, on essaye de mieux caractériser le rôle du couvert végétal dans la succession de ces trois phases types de la dynamique d'érosion.

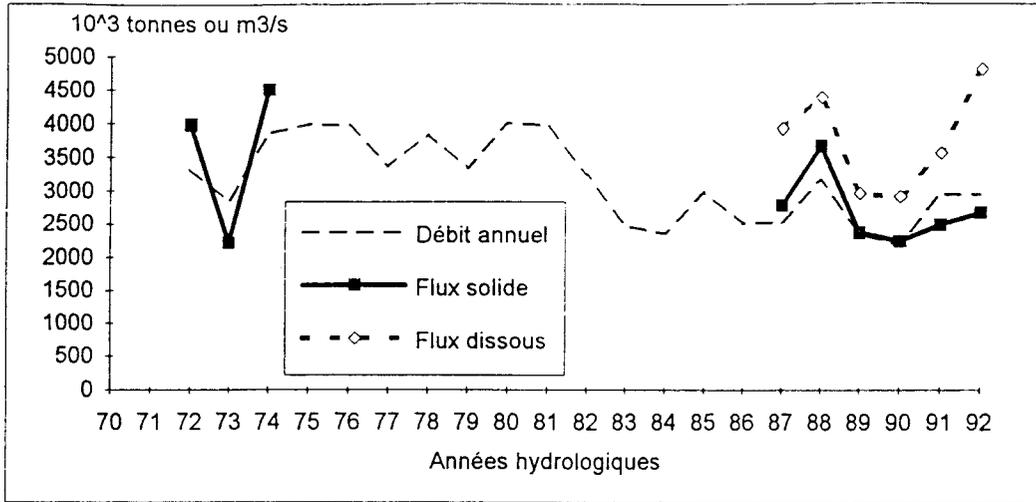
Les calculs des flux annuels de matières exportées ont été effectués par une méthode stochastique basée sur un prélèvement hebdomadaire.

De 1987 à 1992, les flux annuels de matières particulaires exportées ont varié de  $2,2 \cdot 10^6 \text{ t}/\text{an}$  en 1990, l'année la plus sèche, à  $3,7 \cdot 10^6 \text{ t}/\text{an}$  en 1988, l'année la plus humide. La concentration annuelle est faible et varie peu d'une année sur l'autre, de 27 à 37 mg/l. Etant donné la faible variation de la concentration annuelle, le facteur déterminant dans l'importance des tonnages de matières en suspension transportées par l'Oubangui se trouve donc être son module hydrologique annuel.

Pour tenter de voir l'impact des fluctuations hydroclimatiques sur l'exportation des matières en suspension, nous utilisons les mesures effectuées par CALLEDE de 1972 à 1975. Ces années marquent le début de la crise climatique dans cette zone géographique. Les concentrations annuelles obtenues sont légèrement supérieures, 38 mg/l. Il reste à savoir si cet écart est significatif. S'il s'avère que cet écart n'est pas significatif, cela voudrait dire qu'il n'y aurait pas eu de dégradation du milieu centrafricain malgré ces vingt dernières années de sécheresse.

Les flux annuels de matières dissoutes exportées sont toujours supérieurs aux flux annuels de matières particulaires. De 1987 à 1992, ils ont varié de  $2,9 \cdot 10^6 \text{ t}/\text{an}$  en 1990 à  $4,8 \cdot 10^6 \text{ t}/\text{an}$  en 1992. La concentration moyenne annuelle passe de 38 mg/l en 1991 à 52 mg/l en 1992. Cette importance de la charge dissoute en 1992 n'est pas expliquée.

Sur les six années étudiées, on obtient les valeurs moyennes suivantes. Pour un module moyen annuel du fleuve de  $2675 \text{ m}^3/\text{s}$  sur un bassin versant de  $488\,500 \text{ km}^2$ , soit une lame d'eau écoulée de  $1727 \text{ mm}/\text{an}$ , le tonnage de matières exportées, particulaires et dissoutes, est de  $6,5 \cdot 10^6 \text{ t}/\text{an}$ . Les matières particulaires ne représentent que 42% de ce flux, soit  $2,7 \cdot 10^6 \text{ t}/\text{an}$ . Ces chiffres représentent une concentration moyenne annuelle de matières particulaires de 32 mg/l (ou un débit solide de 85 kg/s) et une concentration moyenne annuelle de matières dissoutes de 44 mg/l.



*Flux annuels de matières exportées par l'Oubangui au bief de Bangui*

**DISTRIBUTION DE LA GRANULOMÉTRIE ET DE LA MINÉRALOGIE DE  
LA CHARGE DE FOND SABLEUSE DU BASSIN DE L'OUBANGUI  
(République Centrafricaine, République du Congo et Zaïre) :  
IMPLICATIONS SUR L'ORIGINE ET LA DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE  
DES ALLUVIONS DE L'OUBANGUI**

Claude CENSIER<sup>(1)</sup>, Jean Claude OLIVRY<sup>(2)</sup>

*(1) Centre ORSTOM de Bangui (République Centrafricaine)*

*(2) Centre ORSTOM de Bamako (République du Mali)*

Un échantillonnage des sables de l'Oubangui a été réalisé suivant une maille moyenne de 5 km depuis la confluence du Mbomou et d'Uélé jusqu'à la confluence avec le Congo, soit sur une distance de 1127 km.

Les prélèvements ont été réalisés préférentiellement au niveau de barres sableuses, plus rarement sur les berges.

Tous les affluents de l'Oubangui ont également été échantillonnés ; les prélèvements ont été réalisés à l'aide d'un cylindre de type Berthois dans le chenal, juste en amont de la confluence avec l'Oubangui.

L'échantillonnage a aussi porté sur le Mbomou et ses principaux affluents ; les prélèvements ont été effectués sur les berges. Enfin, les barres sableuses d'Uélé, situées dans les derniers kilomètres de son cours ont été échantillonnées.

Les quelques 400 échantillons ainsi récoltés ont fait l'objet d'une analyse granulométrique et minéralogique.

#### 1°- Analyse granulométrique (fig. 1)

Dans la mesure où les prélèvements de tout le cours de l'Oubangui ont été réalisés en moyennes eaux du fleuve, cette méthode de prélèvement autorise des comparaisons significatives de la granulométrie des sables puisqu'ils résultent d'une dynamique fluviale à peu près identique.

Dans la partie supérieure de l'Oubangui, jusque dans la zone de Bangui (c'est-à-dire aux environs du pk 600), il y a globalement une diminution du grain moyen (Md) des sables et parallèlement une augmentation de l'indice de classement de Bietlot-AFNOR (C2).

En aval de Bangui, le grain moyen est plus important et ne présente pas d'évolution caractéristique jusqu'à la confluence avec le Congo ; l'indice de classement de Bietlot-AFNOR est plus faible qu'en amont de Bangui ; il présente des variations en dents de scie avec globalement une tendance à une diminution jusque vers le pk 50, d'où il augmente très irrégulièrement jusqu'à la confluence avec le Congo.

#### 2°- Analyse minéralogique (fig 1 et 2)

Sur tout le cours de l'Oubangui, les sables présentent la même association de minéraux lourds. les minéraux les plus fréquents sont, par ordre décroissant d'importance, le disthène, les épidotes, le rutile, le zircon, la staurotide, la hornblende et la tourmaline. Le grenat, la sillimanite, l'andalousite et le sphène sont rares ; l'augite, l'hypersthène, la monazite, le corindon et l'anatase ont été décelés..

Quelques variations quantitatives sont perceptibles à l'aval de certains affluents (fig 1).

L'évolution quantitative de certains minéraux donne de bonnes indications sur la dynamique sédimentaire de la charge de fond de l'Oubangui :

- les quantités d'épidotes, d'andalousite et de sphène diminuent régulièrement sur tout le cours de l'Oubangui.
- les quantités de rutile, de zircon et de staurotide sont plus élevées en l'aval qu'en amont du pk 800.
- les quantités de disthène et de hornblende diminuent régulièrement jusque vers le secteur compris entre le pk500 et le pk600, puis augmentent pratiquement jusqu'à la confluence avec le Congo.

De l'amont vers l'aval, les sables du Mbomou acquièrent un cortège minéralogique très semblable à celui de l'Oubangui, alors que le cortège minéralogique des sables de la basse Uélé présente quelques différences quantitatives avec celui de l'Oubangui, notamment pour les teneurs en épidotes, zircon et disthène.

### 3°- Interprétation

- L'Oubangui n'a pas la force érosive suffisante pour creuser son lit ; il transporte seulement sa charge de fond sableuse.

- Les sables proviennent principalement de l'érosion des formations géologiques du bassin du Mbomou et secondairement du bassin d'Uélé.

- Les apports de certains affluents sont repérables par les perturbations granulométriques et par les variations minéralogiques qu'ils entraînent au sein de la charge de fond de l'Oubangui. Les principaux apports viennent de la Kotto, de la Mpoko, de la Lobaye, d'Ibenga, de la Motaba et des tributaires de la plaine alluviale équatoriale.

- Les zones du bassin versant de l'Oubangui où les processus d'érosion sont actuellement actifs peuvent être précisées :

- principalement, le bassin du Mbomou ;
- secondairement, au niveau du bassin moyen de l'Oubangui (plus particulièrement le bassin de la Mpoko), et le bassin inférieur de l'Oubangui.

*- ravin par  
- géomorphologie  
2*

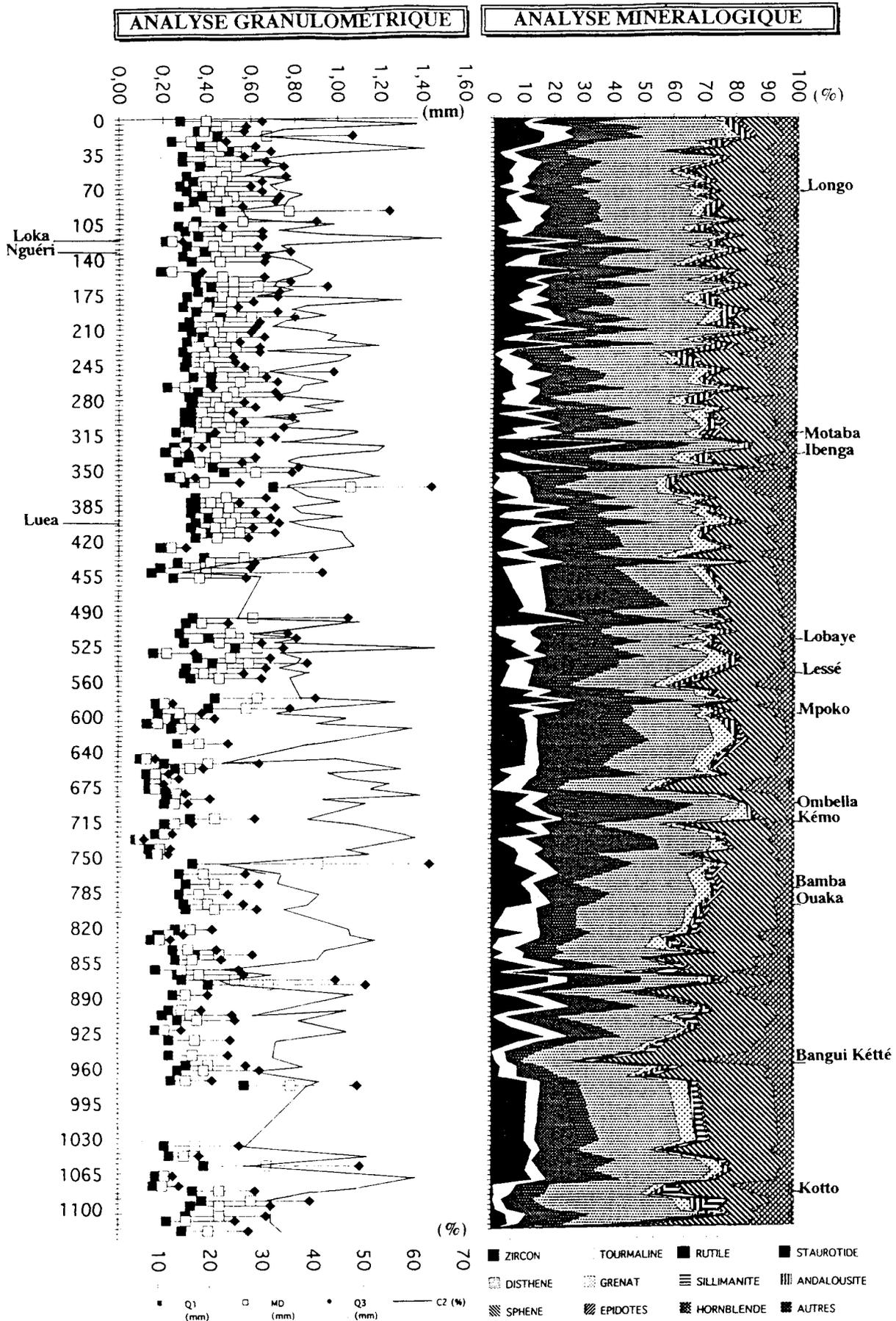
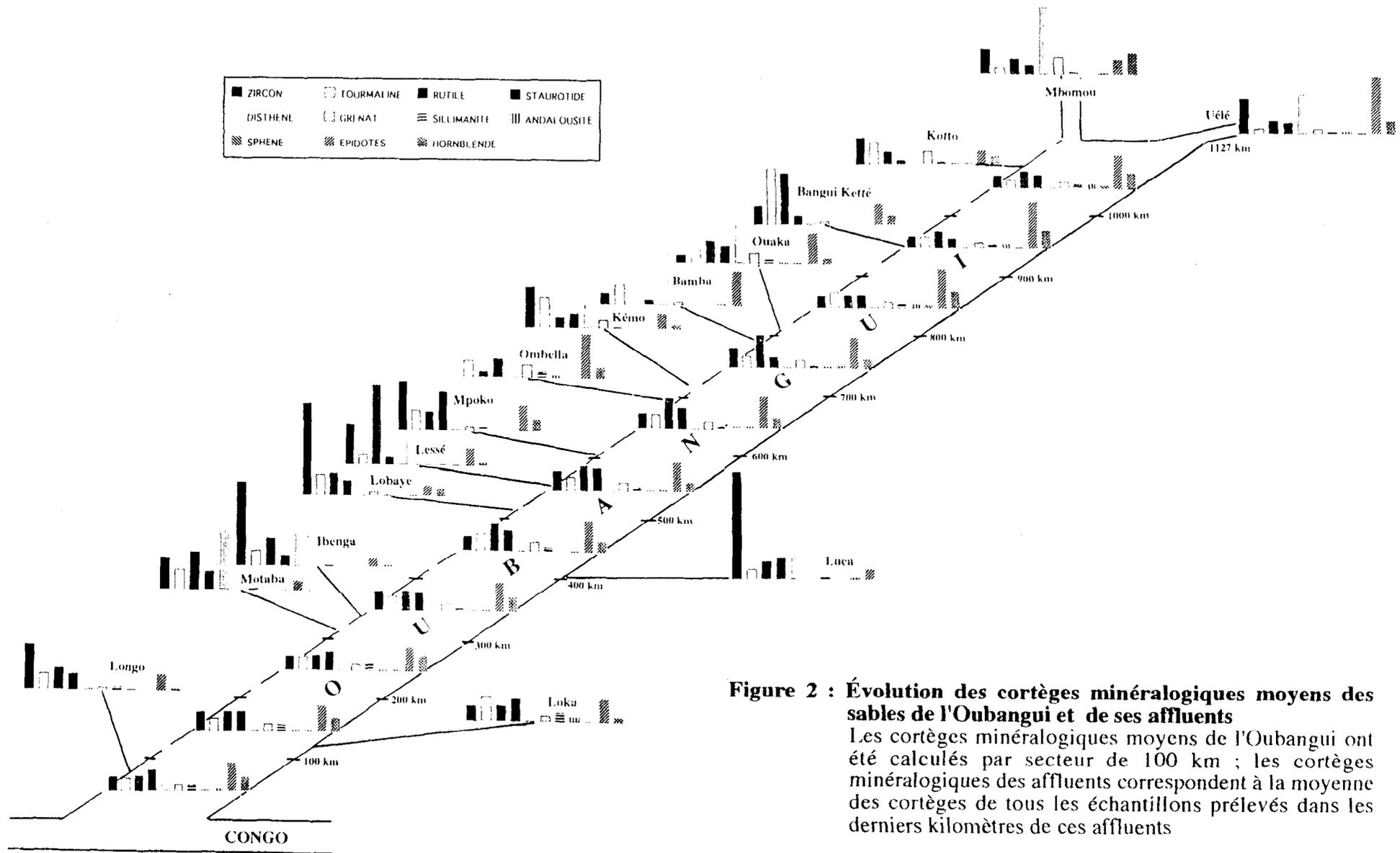


Figure 1 : Évolution des caractéristiques sédimentologiques des sables de l'Oubangui





# GEOCHIMIE DES EAUX DE SURFACE DU HAUT-BASSIN DE L'OUBANGUI

Didier ORANGE<sup>(1)</sup>, Francis SONDAG<sup>(2)</sup>

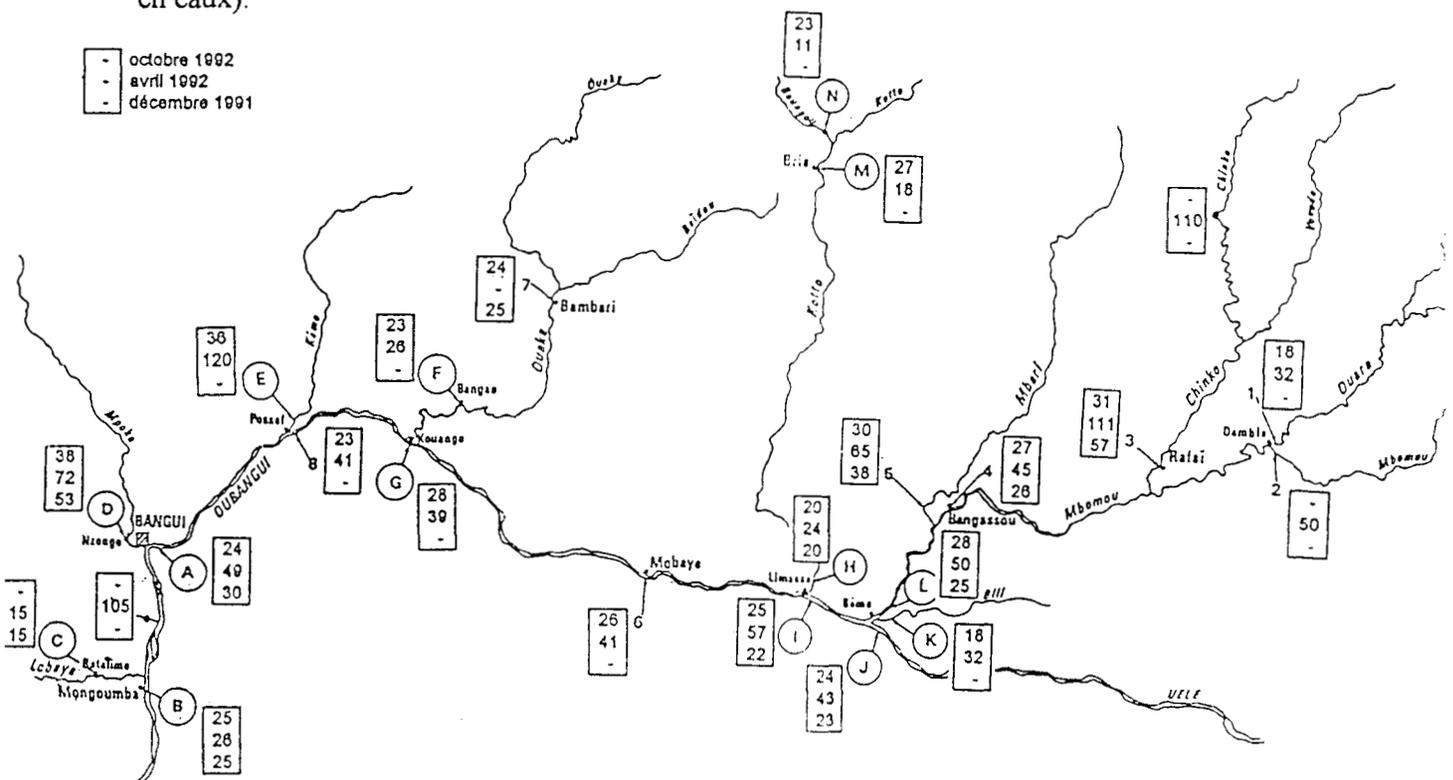
(1) *Laboratoire d'Hydrologie, Centre ORSTOM de Bangui (République Centrafricaine)*

(2) *Laboratoire des Formations Superficielles, Centre ORSTOM de Bondy (France)*

Les résultats des analyses chimiques des eaux prélevées sont présentés. Il s'agit de 262 analyses d'eau se répartissant de la façon suivante : 26 échantillons mensuels de l'Oubangui à Bangui (de novembre 1990 à février 1993), 197 échantillons d'eau de surface de l'ensemble du bassin versant oubanguien centrafricain, 39 échantillons de pluie à Bangui.

Une première photo de la qualité chimique des eaux de surface du bassin centrafricain de l'Oubangui peut être donnée par la mesure des conductivités sur le terrain (cf schéma ci-dessous). Ces eaux de surface sont peu chargées, de 18 à 38 mg/l en saison humide, et de 18 à 120 mg/l en saison sèche. Deux groupes de rivières s'opposent. La Ouara, la Bili, la Kotto, la Ouaka et la Lobaye ont des eaux très faiblement minéralisées toute l'année, caractéristiques d'écoulement sur roches hypersiliceuses (grès, quartzites). Par contre, le Chinko, la Kémo, la Mpoko et, dans une moindre mesure, la Mbari ont des eaux légèrement plus minéralisées et surtout avec des concentrations importantes en saison sèche, caractéristiques d'écoulement sur roches carbonatées ou évaporitiques.

Ces résultats permettent de déterminer les contributions à la qualité chimique des eaux de surface, des différentes entités phytogéographiques (opposition savane-forêt), pédologiques (rôle respectif des sols ferrugineux et des sols ferrallitiques), lithologiques (les carbonates, les salines, les roches hypersiliceuses, les roches basiques) et des zones climatiques (disponibilité en eaux).



Conductivités des eaux de surface du bassin de l'Oubangui (en  $\mu\text{S/cm}$  à  $20^\circ\text{C}$ )

**DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE DE LA CHARGE DE FOND SABLEUSE DU  
COURS MOYEN ET INFÉRIEUR DE LA SANGHA  
(RÉPUBLIQUE DU CONGO)**

**Claude CENSIER<sup>(1)</sup>**

*(1) Centre ORSTOM de Bangui (République Centrafricaine)*

La Sangha, qui résulte de la confluence de la Mambéré et de la Kadei, a une longueur totale de 1 333 km, si on admet que la Kadei en représente la branche supérieure, et constitue, après l'Oubangui, le deuxième principal affluent de rive droite du fleuve Congo (fig. 1).

Un échantillonnage de la charge de fond (à dominante sableuse), a été réalisé sur une distance de 511 km, de la confluence avec le Congo jusqu'au delà de la ville de Ouesso. Les prélèvements ont été faits entre la mi-Janvier et la mi-Février (1991) au niveau des barres sableuses qui apparaissent à cette époque de l'année. L'espacement moyen entre deux prélèvements consécutifs a été de 10 km.

Les échantillons ont fait l'objet de deux types d'analyses : l'analyse granulométrique et l'analyse des minéraux lourds.

Sur tout le long du secteur étudié, il n'y a pas une évolution continue caractéristique aussi bien des paramètres granulométriques que des paramètres minéralogiques (fig. 2). Ceci indique que ce n'est pas le même stock de sable qui évolue sur tout le cours moyen et inférieur de la Sangha.

Les associations minéralogiques observées dans les sables de la Sangha en amont de la confluence de la Ngoko indiquent que le matériel détritique véhiculé à ce niveau par la Sangha résulte d'un mélange des produits de démantèlement des différentes formations géologiques du bassin versant supérieur de la Sangha avec une prédominance de produits de démantèlement de la Formation gréseuse mésozoïque de Carnot et du Complexe Schisto-quartzitique précambrien (fig. 1).

Les apports de la Ngoko sont repérables par les perturbations granulométriques et minéralogiques qu'ils entraînent juste à l'aval de la confluence avec la Sangha (fig 2). Cependant, ces apports sont peu importants puisqu'en moins de 30 km, les perturbations sont complètement estompées.

Les apports des autres affluents sont négligeables (Ndoki) ou extrêmement modestes (Likouala aux herbes, Djoubou et Ebangi).

Sur tout le cours moyen et inférieur de la Sangha, on constate que globalement, aux brusques variations granulométriques, correspondent d'importantes variations quantitatives des cortèges minéralogiques, et qu'à une évolution progressive de la granulométrie correspond une évolution également progressive des cortèges minéralogiques.

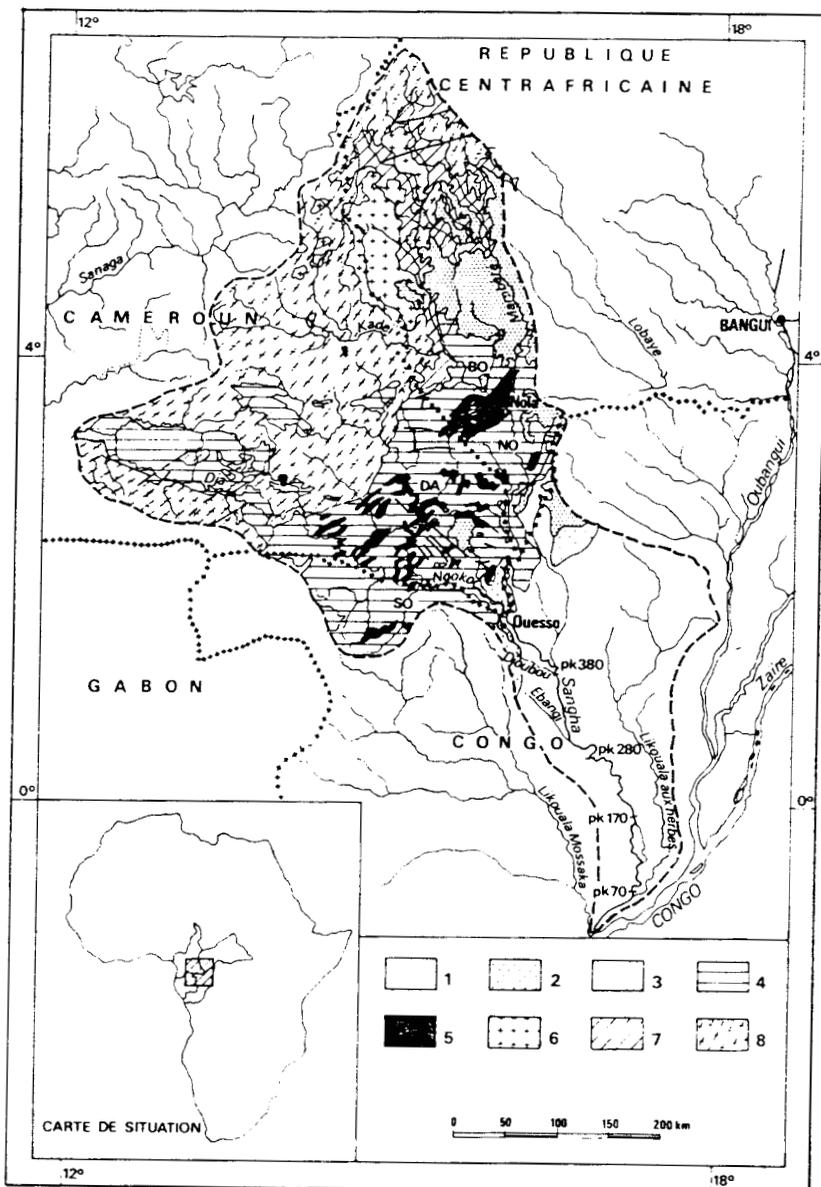
Cette approche sédimentologique permet donc de distinguer les zones du bassin soumises à l'érosion de celles qui ne le sont pas.

C'est ainsi que par analyse factorielle des correspondances des données minéralogiques, il apparaît que les zones comprises entre les pk70 et 170 et entre les pk280 et 380 sont actuellement soumises à l'érosion ; l'érosion des alluvions plio-quadernaires de la cuvette congolaise se manifeste par un apport de matériel contenant un pourcentage plus élevé de staurotide, disthène et hornblende que ne contiennent les sables venant du cours supérieur de la Sangha. Un apport par érosion du lit ou par la plaine alluviale est également perceptible dans le cours de la Sangha en aval de la confluence avec la Likouala aux herbes.

De plus, l'analyse granulométrique montre qu'en aval de la confluence de la Ngoko, les sables résultent d'un mélange des apports par le cours supérieur de la Sangha, par la Ngoko et par des processus d'érosion des berges ou du lit de la Sangha.

Ainsi, de Ouesso jusqu'à la confluence avec le Congo, on distingue quatre zones soumises à l'érosion à des degrés divers et une zone où les processus d'érosion sont absents ou très peu marqués (fig. 3).

Enfin, les zones soumises à l'érosion apportent une quantité de matériel importante puisqu'il y a, globalement, une modification des caractéristiques minéralogiques des sables du cours moyen et inférieur de la Sangha. De ce fait, les sables déversés dans le Congo proviennent tout autant, si ce n'est plus, de l'érosion des formations plio-quaternaires de la cuvette congolaise que de l'érosion des formations du bassin supérieur de la Sangha.



**Figure 1 : Cadre géologique du bassin de la Sangha**

1 : formations plio-quaternaires de la cuvette congolaise - 2 : formations cénozoïques - 3 : formations crétacées - 4 : complexe schisto-quartzitique précambrien (BO : série de la Bolé ; NO : série de Nola ; DA : série du Dja ; SO : série de Sembé Ouesso) - 5 : dolérites - 6/7/8 : complexe granito-gneissique : 6 : granites intrusifs ; 7 : gneiss ; 8 : granites syntectoniques

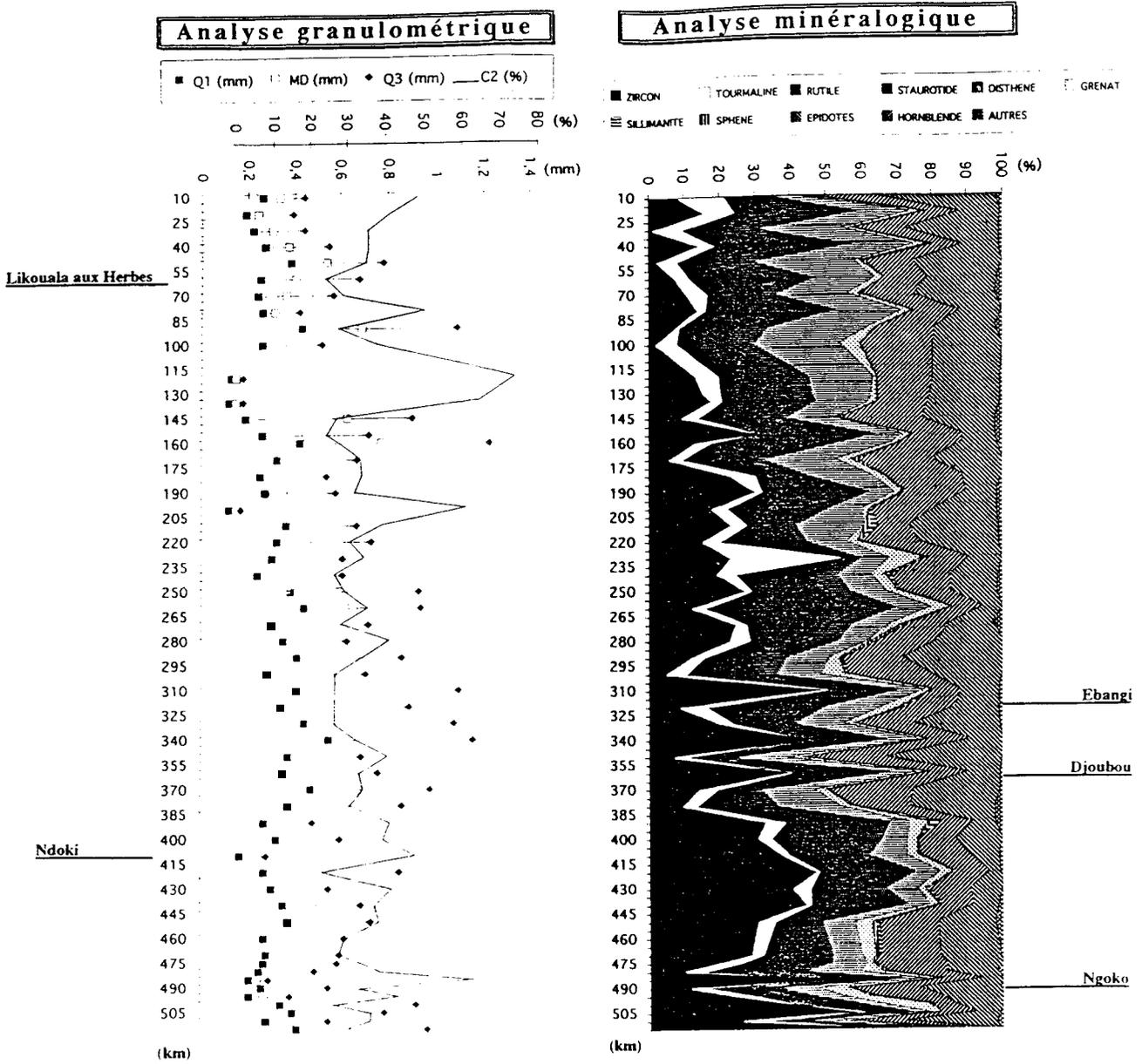
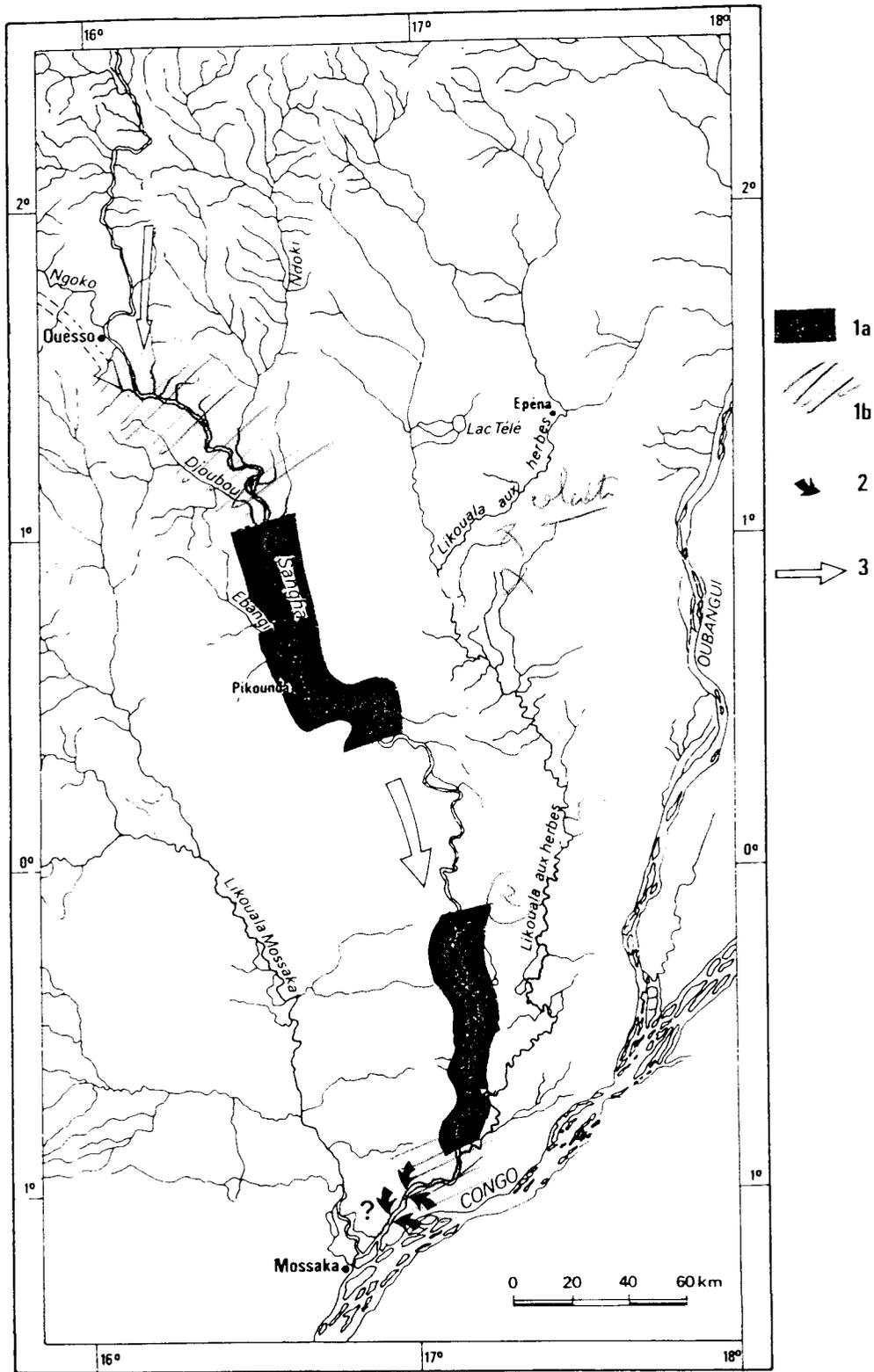


Figure 2 : Evolution des caractéristiques sédimentologiques des sables du cours moyen et inférieur de la Sangha



**Figure 3 : délimitation des zones soumises à l'érosion dans le bassin moyen et inférieur de la Sangha**

1a : zones soumises à une érosion importante - 1b : zones soumises à une érosion modérée - 2 : apports par la plaine alluviale - 3 : zones où dominent les processus de transport

**ANALYSE SÉDIMENTOLOGIQUE DE LA CHARGE DE FOND SABLEUSE  
DE LA LIKOUALA AUX HERBES (République du Congo) :  
MISE EN ÉVIDENCE D'UNE DÉRIVE OCCIDENTALE  
DU COURS INFÉRIEUR DE LA SANGHA**

**Claude CENSIER<sup>(1)</sup>, Bernard POUYAUD<sup>(2)</sup>,  
Alain LARAQUE<sup>(3)</sup>, Bienvenue MAZIEZOULA<sup>(3)</sup>**

*(1) Centre ORSTOM de Bangui (République Centrafricaine)*

*(2) DEC, Direction Générale de l'ORSTOM (Paris)*

*(3) Centre DGRST-ORSTOM de Brazzaville (République du Congo)*

Les sables de la charge de fond de la Likouala aux herbes ont été échantillonnés depuis la confluence avec la Sangha jusqu'au niveau de la ville d'Épéna (pk 530) (fig. 1). Les prélèvements ont été effectués dans l'axe du chenal, en moyenne tous les dix kilomètres, à l'aide d'un cylindre de type Berthois. Au total, 56 échantillons ont fait l'objet de deux types d'analyse sédimentologique : analyse granulométrique et analyse des minéraux lourds.

Afin de relier les caractéristiques sédimentologiques de la charge de fond avec l'hydrodynamisme de la Likouala, le coefficient de sinuosité, qui est le rapport de la longueur en suivant l'axe du chenal sur la distance parcourue en ligne droite entre deux points d'un cours d'eau, a été calculé sur toute la longueur du cours étudiée. De plus, la longueur des portions de berges actuellement érodées par la Likouala a été estimée et un coefficient d'érosion des berges, représentant le rapport entre la longueur de berges érodées sur la longueur de l'axe du chenal entre deux points, a été défini.

De l'examen des caractéristiques sédimentologiques des sables de la Likouala, il ressort que (fig 2) :

- d'un point de vue granulométrique : de l'amont jusqu'au pk 200 environ, il y a une succession de "granoclasses positifs" avec parallèlement amélioration globale du classement des sables ; du pk 200 jusqu'à la confluence, les sables sont régulièrement plus grossiers et moins bien classés qu'à l'amont.

Ces caractéristiques granulométriques sont dues à l'aspect méandrique de la Likouala plus prononcé à l'aval du pk 200.

Au niveau des méandres, il y a affouillement des alluvions, phénomène qui n'implique pas nécessairement érosion des berges, mais qui entraîne un mélange de sédiments dans l'axe du chenal c'est-à-dire là où la vitesse du courant est la plus élevée. Ces deux effets conjugués expliquent la grossièreté et le mauvais classement de la charge de fond sableuse du cours inférieur de la Likouala.

- d'un point de vue minéralogique : le même cortège minéralogique s'observe sur tout le cours de la Likouala : pour l'ensemble des échantillons, le disthène est présent en quantité moyenne (30 - 60%), le zircon et le rutile sont peu abondants (10 - 30%), la staurotite, la tourmaline, les épidotes et la sillimanite sont rares (1 - 10%), le grenat, le sphène, l'andalousite et la hornblende ont été décelés (<1%).

Une brusque variation quantitative apparaît au sein du cortège minéralogique à partir du pk 130 pour ne s'atténuer que très progressivement jusqu'à la confluence avec la Sangha : il y a augmentation du pourcentage de zircon et de rutile, apparition plus régulièrement de la hornblende, forte diminution du pourcentage de disthène et faible de tourmaline.

Cette brutale variation quantitative indique qu'il y a des apports détritiques à la charge de fond véhiculée par la Likouala.

Dans la mesure où la likouala ne reçoit pas d'affluent important dans son cours inférieur, et qu'il n'y a pas de corrélation entre l'érosion des berges et ces particularités minéralogiques, les apports ne peuvent être reliés qu'avec l'aspect méandrique du cours de la Likouala qui entraîne un affouillement des alluvions. Ce phénomène dont les effets s'observent dès le pk200, apporte dans le chenal, à partir du pk 130, un matériel minéralogiquement différent de celui véhiculé par le cours amont de la Likouala.

Ce matériel correspond donc à des alluvions récentes dont l'origine est différente de celle des sables apportées par le cours supérieur de la Likouala ; elles sont les témoins d'une modification récente du réseau hydrographique dans la partie inférieure de la Likouala aux herbes.

Une étude comparée des cortèges minéralogiques des sables de la Likouala aux herbes et de la Sangha par analyse factorielle des correspondances, montre qu'en aval du pk130, les sables de la Likouala présentent un cortège minéralogique intermédiaire entre celui des sables du cours supérieur de la Likouala et de la Sangha.

Ce résultat indique donc que la confluence entre la Likouala aux herbes et la Sangha devait se situer vers le pk130 dans un passé récent.

Compte tenu de la configuration actuelle du bassin inférieur de la Sangha, ce résultat met en évidence une dérive occidentale du cours inférieur de la Sangha qui s'est produite dans un passé récent (fig. 3).

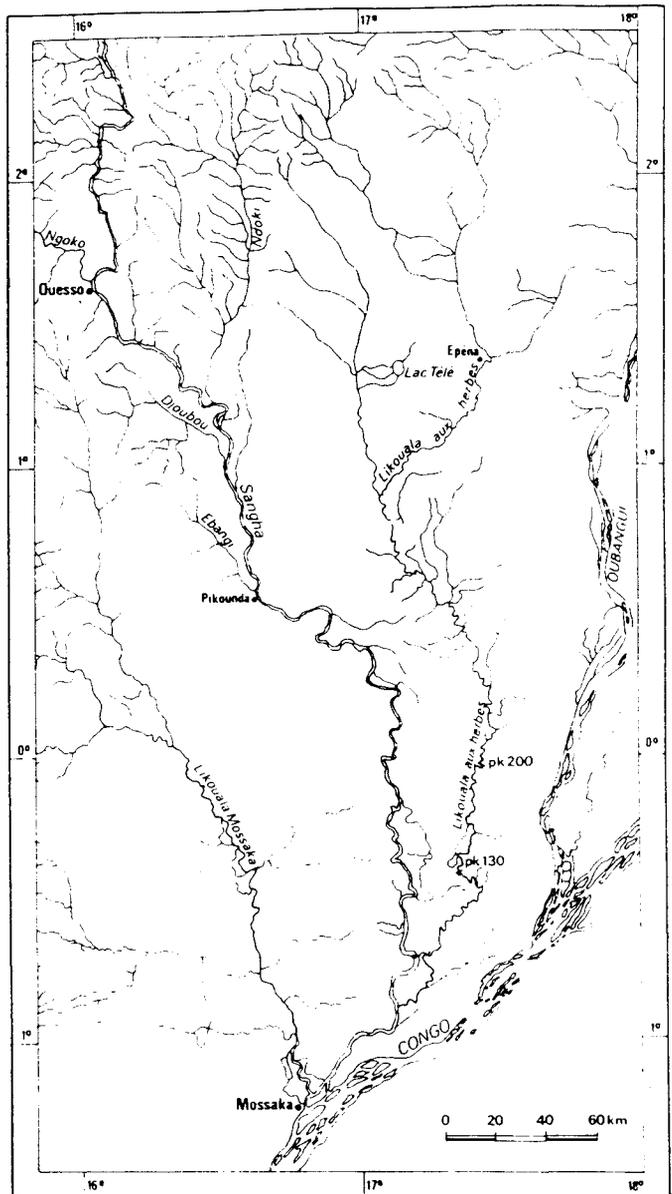
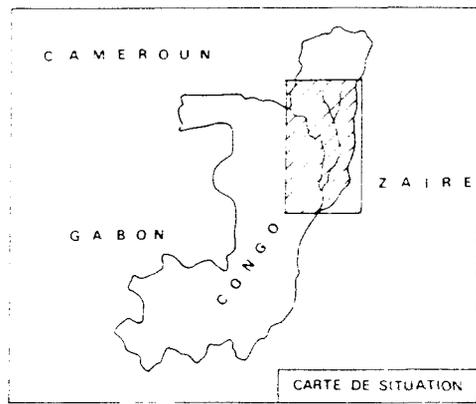
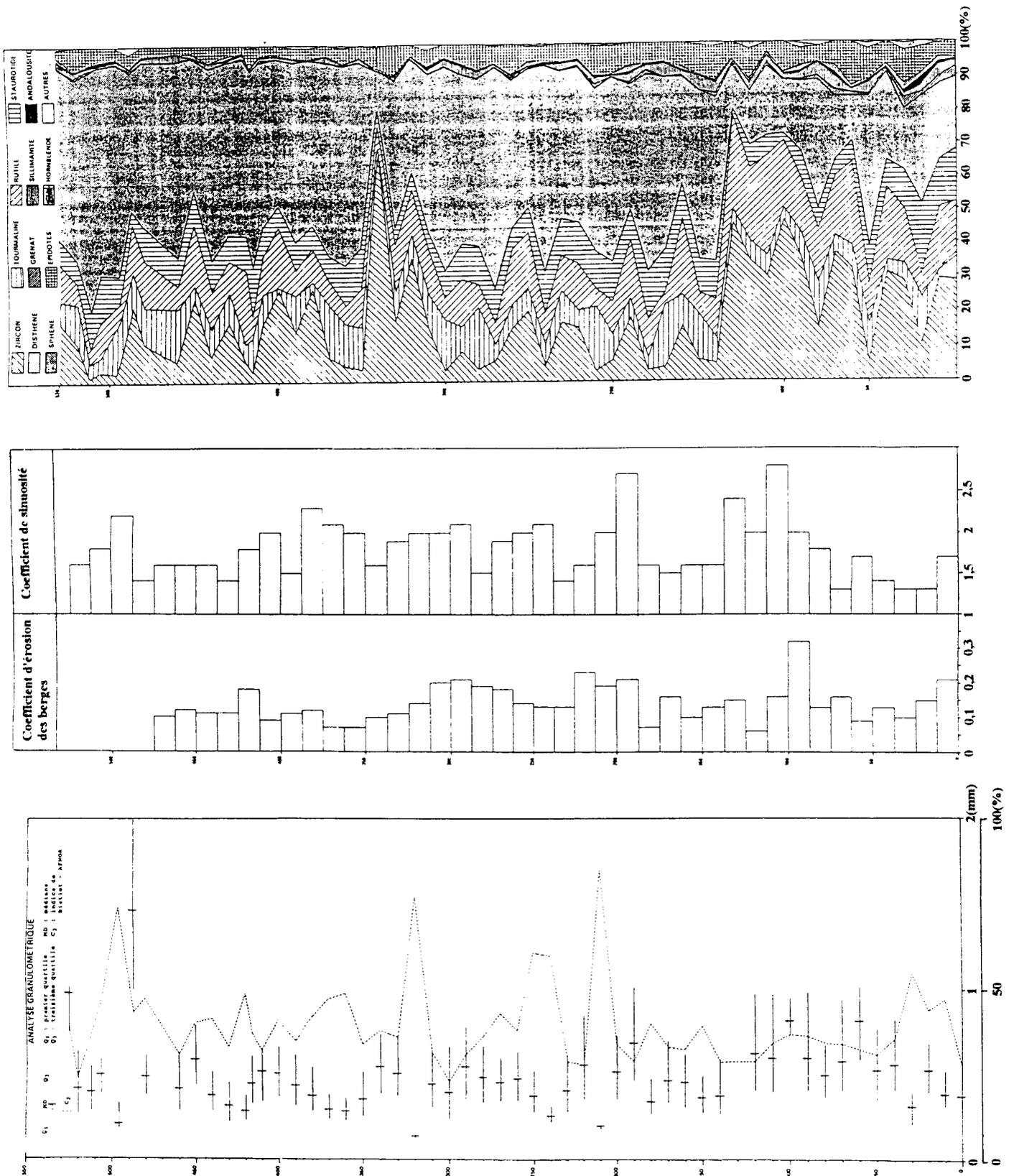
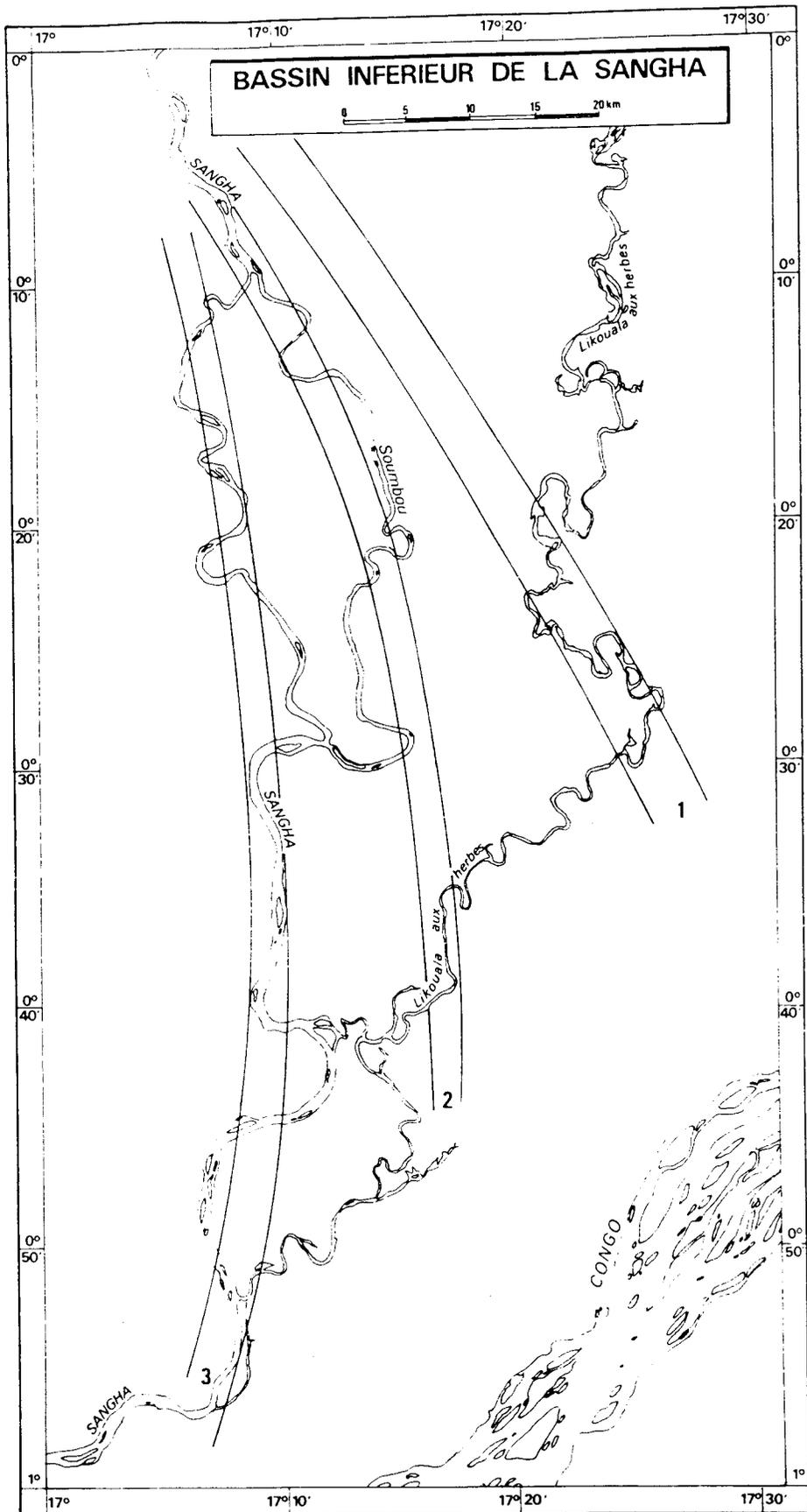


Figure 1 : localisation du secteur d'étude



**Figure 2 : Evolution des caractéristiques sédimentologiques des sables de la Likouala aux herbes et évolution de la sinuosité de son cours et de l'érodibilité de ses berges**



**Figure 4 : Évolution de la dérive du cours inférieur de la Sangha et de ses relations avec la Likouala aux herbes**

1 : position de la confluence entre la Sangha et la Likouala aux herbes déduite de cette étude - 2 : position intermédiaire - 3 : axe actuel

**BILANS HYDROLOGIQUES ET GEOCHIMIQUES D'UN  
ECOSYSTEME FORESTIER EQUATORIAL DE L'AFRIQUE  
CENTRALE : La Ngoko à Moloundou**

*L. SIGHA-NKAMDJOU<sup>a</sup>, P. CARRE<sup>b</sup>*

**RESUME**

Formée par le Dja et la Boumba, la Ngoko, un des tributaires de la Sangha (affluent rive droite du fleuve Congo), draine à sa sortie de Moloundou (sud-est du Cameroun) un écosystème de 67 000 km<sup>2</sup> couvert à 95 % de la forêt équatoriale dense. De 1989 à 1992, ce bassin a fait l'objet d'une étude hydrochimique visant à la compréhension de son comportement naturel. L'approche utilisée a consisté à quantifier et à qualifier les substances apportées par les précipitations ainsi que les matériaux issus de la dégradation des versants et véhiculés par les cours d'eau (figure 1).

La pluviométrie moyenne sur le bassin de la Ngoko à Moloundou calculée de 1950 à 1991 est de 1 510 mm. L'étude a permis de déceler une zone de faibles précipitations située à la frange est du bassin, dans le couloir Yokadouma-Moloundou. Ce déficit pluviométrique serait sans doute lié à la succession de collines de direction nord-sud en aval de Biwala, qui constitueraient un obstacle orographique à l'avancée de la mousson du Golfe de Guinée vers l'est. Le bilan hydrologique a fait ressortir un important déficit hydrologique (80 %) lié essentiellement à l'évapotranspiration (tableau 1).

Le transport de matières en suspension est passé de 8 à près de 14 t.km<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup> de 1989 à 1992 (figure 2). Cette augmentation serait sans doute liée à une déforestation en nette progression sur le bassin. La fraction minérale de ces matières est constituée à 80 % d'argiles essentiellement de type kaolinitique. A l'inverse des matières particulaires, les substances dissoutes des eaux pluviales et fluviales, évaluées dans l'ordre à 8 et 17 t.km<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>, n'ont pas varié au cours des trois cycles d'observations. Ce comportement traduit une stabilité des facteurs qui contrôlent les apports atmosphériques et l'altération chimique des roches. Les eaux de la Ngoko de type bicarbonaté calco-magnésien, appartiennent au domaine de stabilité de la kaolinite. Le carbone organique total a été évalué à 4 t.km<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>. Le flux de carbone organique est exporté essentiellement sous sa forme dissoute ; en moyenne, elle est de 3,2 t.km<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>, soit 80 % du total. En conclusion, l'étude a mis en évidence de faibles productions de matières particulaires et dissoutes (32 t.km<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>) sur le bassin de la Ngoko.

*a : Institut de Recherches Géologiques et Minières (IRGM) BP 4110 Yaoundé Cameroun*

*b : ORSTOM-Hydrologie BP 5045, 34032 Montpellier cédex 1*

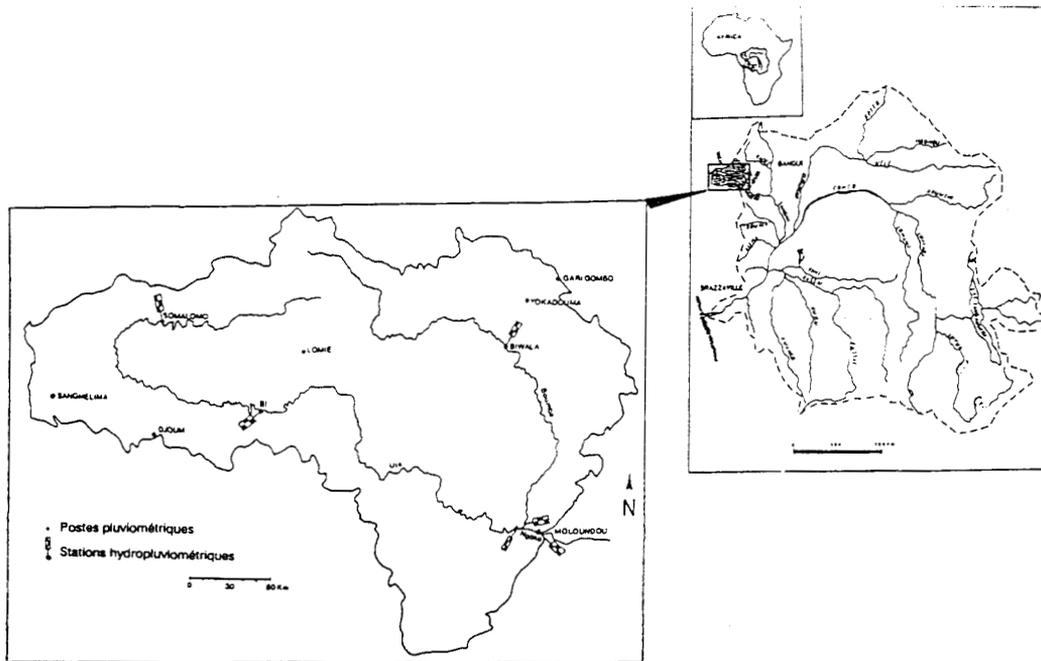


Figure 1 : Situation du bassin versant de la Ngoko et localisation des sites d'échantillonnage, d'après SEYLER et al (1993)

Tableau 1: Bilans hydrologiques

C. D'EAU	STATIONS	1989/1990					1990/1991					1991/1992					1989/1992					Moyenne Interannuelle					
		P	Ve	Le	De	Ke	P	Ve	Le	De	Ke	P	Ve	Le	De	Ke	P	Ve	Le	De	Ke	P	Ve	Le	De	Ke	
Boumba	Biwala	1685	3,47	340	1345	20,2	1705	3,6	350	1355	20,5	1530	4,38	425	1105	27,8	1640	3,82	370	1270	22,6	1640	3,34	325	1315	19,8	
Boumba	Mol.-Bac	1350	9,02	330	1020	24,4	1390	9,27	340	1050	24,5	1365	9,24	340	1025	24,9	1365	9,18	340	1025	24,9	1385					
Dja	Somalomo	1705	2,58	475	1230	27,9	1545	2,23	410	1135	26,5	1840	2,11	385	1455	20,9	1695	2,31	425	1270	25,0	1660	2,08	380	1280	22,9	
Dja	Bi	1705	9,15	470	1235	27,6	1620	8,1	415	1205	25,6	1690	7,28	375	1315	22,2	1675	8,17	420	1255	25,1	1710	6,97	360	1350	21,3	
Dja	Mol.-SOTREF	1605	14,2	360	1245	22,4	1610	15,4	390	1220	24,2	1520	14,4	365	1155	24,0	1580	14,7	370	1210	23,4	1635					
Ngoko	Moloundou	1480	23,1	345	1135	23,3	1500	24,6	370	1130	24,7	1440	23,8	355	1085	24,7	1470	23,9	360	1110	24,5	1510					

Légende :

P : Pluviométrie moyenne sur le bassin versant en mm ;  
 Ve : Volume écoulé en km<sup>3</sup> ; Le : Lamme d'eau écoulée en mm ;  
 De : Déficit d'écoulement en mm ; Ke : Coefficient d'écoulement en %  
 Moyenne interannuelle de l'origine des observations à 1992.

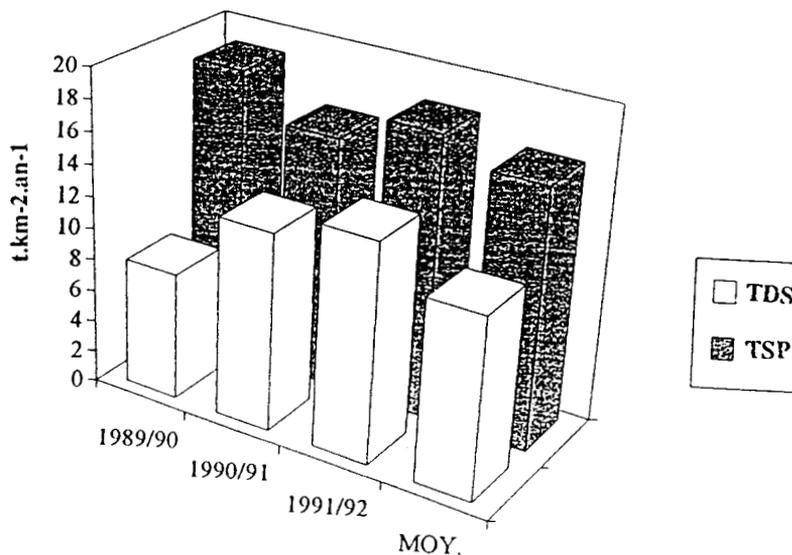


Figure 2 : Transports spécifiques particulaire (TSP) et dissous (TDS)

## TRANSFERTS DES ELEMENTS MAJEURS DANS UN BASSIN FORESTIER DE LA ZONE EQUATORIALE HUMIDE

*Palmit*  
P. SEYLER, SIGHA NKAMDJOU, J.C. OLIVRY £

Le bassin versant de la Ngoko constitue le cours amont de la Sangha, un des affluents principaux de la rive droite du Congo. Formée du Dja et de la Boumba, la Ngoko draine un bassin versant de 67000 km<sup>2</sup>, lithologiquement homogène et couvert à 95 % de forêt dense primaire. Ce bassin, caractéristique de l'écosystème forestier tropical humide, a été choisi en raison de son caractère strictement forestier et de son éloignement de possibles sources de contamination anthropique.

Durant 3 cycles hydrologiques (1989-1992), correspondant à une hydraulicité moyenne, des campagnes de mesures et de prélèvements ont été effectuées aux exutoires des sous bassins et à celui du bassin principal. Afin de connaître précisément les flux en éléments majeurs entrant dans le système, un échantillonnage systématique des précipitations a été mis en place et les échantillons d'eaux de pluie et de rivière (plus de 400) ont été analysés pour les éléments majeurs, les isotopes de la molécule d'eau ( $\delta^{18}O$  et  $2H$ ), le carbone dissous et particulaire.

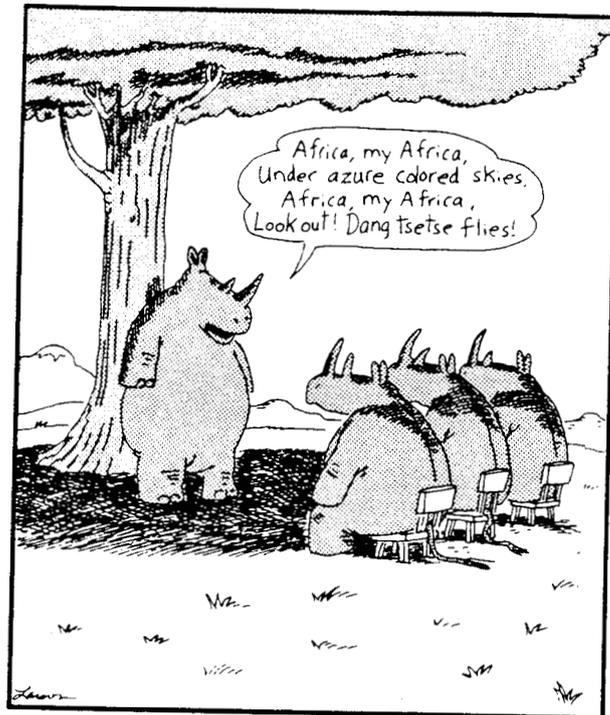
Dans cet exposé, seuls l'origine, les variations et les bilans de transferts des éléments majeurs seront discutés. Ainsi, pour le bassin de la Ngoko, le Cl, le Na, les SO<sub>4</sub> et les NO<sub>3</sub> sont essentiellement d'origine atmosphérique, mais plus précisément, le Cl et le Na viennent de l'aérosol océanique transporté par la mousson, alors que les SO<sub>4</sub>, une partie des NO<sub>3</sub> et du K proviennent de l'aérosol généré par la forêt (avec pour le K, une origine également terrigène allochtone).

L'étude des transports chimiques dissous a montré trois types de comportement des éléments majeurs: Pour le Ca, le Mg et les HCO<sub>3</sub>, il existe une relation curvilinéaire significative entre leurs concentrations et le débit liquide de la rivière, ce qui suggère un simple processus de dilution de la charge dissoute des eaux de crue d'origine superficielle par les eaux souterraines. Pour les ions dont l'origine est en majeure partie atmosphérique, il n'y a pas de relation stricte débit/concentration. Enfin pour les NO<sub>3</sub>, la SiO<sub>2</sub> dissoute, l'augmentation corrélative de leurs concentrations et du débit est vraisemblablement lié au lessivage de la litière forestière et à l'écoulement hypodermique lors des premières crues.

Environ 60% des exportations sont dus aux bicarbonates et à la silice. Après correction des apports atmosphériques et s'il l'on considère que l'écosystème de la Ngoko est en



# - FLEUVE NIGER



Rhino recitals

## **LE REGIME HYDROLOGIQUE DU NIGER SUPERIEUR ET LE DEFICIT DES DEUX DERNIERES DECENNIES**

J.C. Olivry, J.P. Bricquet, F. Bamba, M. Diarra

### Résumé :

Troisième fleuve d'Afrique par sa longueur (4200 km), le Niger est issu de la dorsale guinéenne qui sépare la moyenne Guinée, de la Sierra Léone et du Libéria. Il s'écoule suivant une direction générale Nord-Est jusqu'aux confins du Sahara. Dans sa traversée des régions sahéliennes et subdésertiques, il perd dans la cuvette lacustre une bonne part de ses apports hydriques et suit une grande boucle avant de retrouver la route de l'océan au fond du Golfe de Guinée.

Le Niger supérieur a un régime hydrologique du type tropical de transition classique. Son bassin est soumis aux domaines climatiques guinéen, sud et nord-soudanien, sahélien et subdésertique dans la cuvette lacustre. Alimenté dans son bassin supérieur par des affluents exclusivement guinéens, le Niger reçoit à son arrivée dans le Delta Intérieur les apports du Bani, principal affluent. L'ensemble du bassin versant est alors d'environ 250 000 km<sup>2</sup>.

La chronique des débits du Niger constitue, avec celle du Sénégal à Bakel, l'information intégrée la plus complète que l'on ait sur les variations hydroclimatiques de l'Afrique de l'Ouest depuis le début du siècle. La première station hydrométrique du fleuve Niger a été installée à Koulikoro en 1907 ; le bassin versant du Niger couvre alors une superficie de 120 000 km<sup>2</sup> dont seulement un cinquième au Mali. Le débit moyen interannuel calculé sur 83 ans est de 1420 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, soit un module spécifique voisin de 11,8 l s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>. Avec une hauteur de précipitation interannuelle estimée à 1600 mm et une lame d'eau écoulée de 370 mm, le coefficient d'écoulement moyen atteint 23% ; la reprise par évaporation serait de 1230 mm.

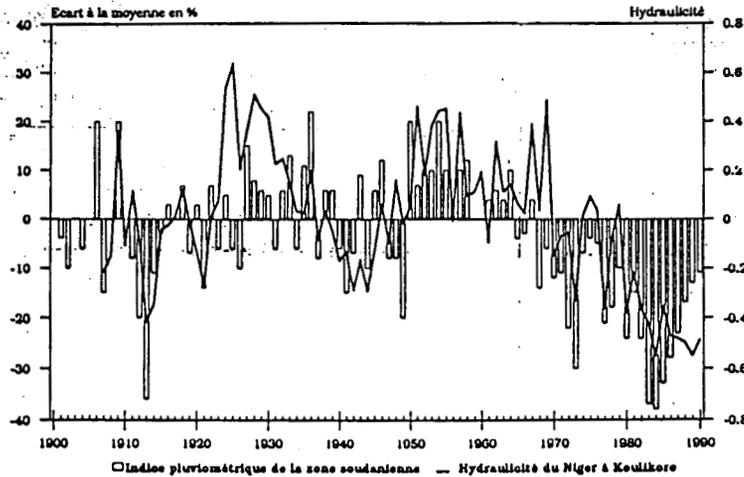
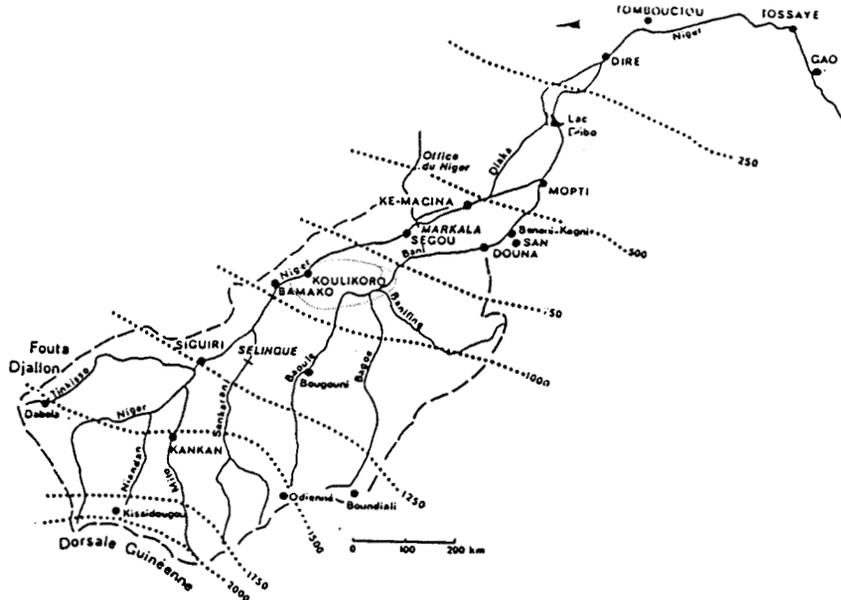
Le régime des précipitations commande la grande variabilité saisonnière des débits du fleuve. Pendant 6 mois, de janvier à juin, les débits des basses eaux représentent moins de 7% du débit annuel. La remontée des débits s'annonce en mai, mais ne devient vraiment significative qu'au mois de juillet. Le coefficient mensuel du mois d'août est de 17%, il passe à 30% en septembre et à 25% en octobre ; le maximum de la crue a lieu généralement dans la seconde quinzaine de septembre. La décrue est rapide et dès la fin novembre, on se trouve en phase de vidange des réserves souterraines.

La dernière station du Niger avant son entrée dans la cuvette lacustre est celle de Ké-Macina (bassin de 141 000 km<sup>2</sup>). Les modules ont perdu de 250 à 50 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> suivant les années ; le prélèvement naturel (évaporation) et celui dû aux irrigations (Office du Niger en particulier) serait en moyenne de 135 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, soit près de 10% de l'apport hydrique initial. Le module interannuel est de 1207 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> sur la période 1952-1990.

En rive droite du Niger, le Bani draine les eaux d'un bassin versant dont les limites Sud se situent près d'Odienné et Boundiali en Côte d'Ivoire. Nettement moins arrosé (1200 mm) que le Haut Niger guinéen, il est soumis au climat tropical pur. Le bassin couvre 101 600 km<sup>2</sup> à la station de Douna observée depuis le début des années 50. Sur la période 1953-1990, le module interannuel est de 419 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, soit un module spécifique de 4,12 l s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>, ce qui correspond à une valeur presque trois fois plus faible que celle du Niger calculée sur la même période (11,2 l s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>). La lame écoulée est de 130 mm, soit un coefficient d'écoulement de 10,8%. La variabilité saisonnière des débits montre une longue période de faibles écoulements (moins de 5% de l'écoulement annuel transitent à Douna sur 6 mois). A l'étiage, on a pu observer dans les années récentes un arrêt de l'écoulement. Le tiers de l'écoulement annuel transite en septembre, près des quatre cinquièmes d'août à octobre. La crue du Bani atteint le plus souvent son maximum dans la seconde quinzaine de septembre ou début octobre.

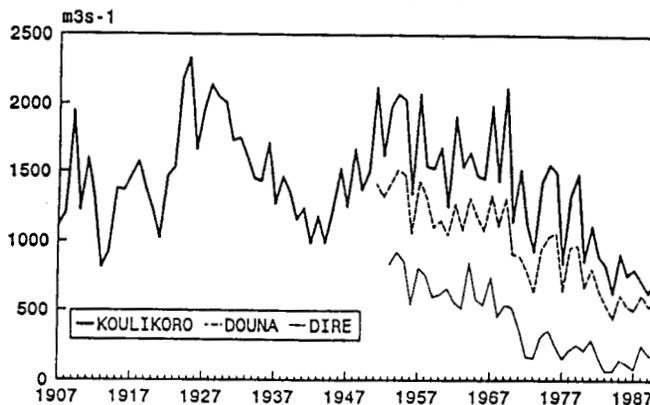
L'évolution des modules de Koulikoro, Douna et Diré montre que le Niger et le Bani ont connu depuis le début du siècle, comme le fleuve Sénégal et beaucoup d'autres fleuves de la zone tropicale pure, une sécheresse en 1913, au début des années 40 et, enfin, à partir des années 70. Deux périodes d'abondantes précipitations donnent des débits excédentaires de 1925 à 1935, puis dans les années 50 et 60. Mais en dépit de certains sursauts d'une relative abondance en 1974, 75, 76 puis en 1979, l'hydraulicité des fleuves de la région n'a cessé de se dégrader. Après le minimum absolu de 1984, le module le plus bas est celui de 1989 sur le Niger. Cette tendance persistante à la baisse doit être soulignée car elle montre une dégradation durable du système hydrologique malgré un retour assez sensible à de meilleures conditions de précipitations. Le léger "regain" montré par l'indice de Lamb reste tout à fait insuffisant pour impliquer un renversement de tendance rapide dans l'hydraulicité du fleuve Niger, comme le montre bien le décalage récent entre l'évolution de l'hydraulicité du fleuve et celle de l'indice pluviométrique des régions soudanaises inspiré de Lamb. L'explication du phénomène a été donnée dans l'épuisement progressif des aquifères des bassins versants. On a parlé de "fleuves malades d'Afrique" et mis en évidence une accélération importante de la phase de tarissement. L'augmentation du coefficient de tarissement - pratiquement du simple au double - signifie que les nappes phréatiques du bassin ont vu leur extension considérablement réduite. Un retour dans l'écoulement de surface des débits à tarissement moins rapide suppose une reconstitution des réserves qui nécessitera pendant plusieurs années, une alimentation soutenue de précipitations abondantes. Les processus en cause ont été identifiés ; ils ont une incidence marquée également sur le niveau de l'écoulement annuel et la puissance des crues. A la sécheresse climatique se surimpose, avec un

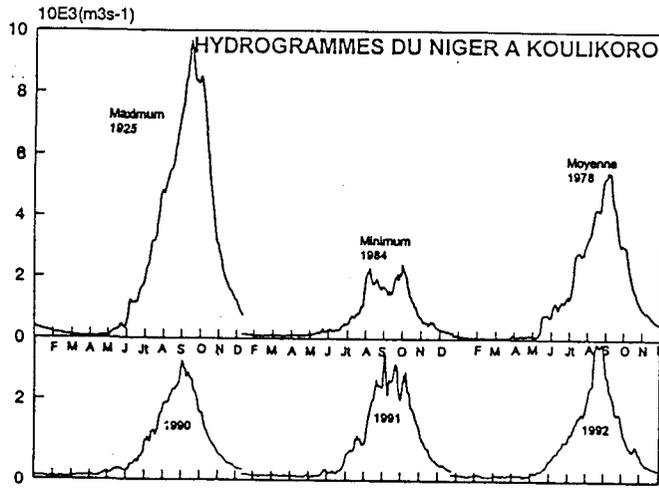
décalage pluriannuel, une "sécheresse phréatique". On montre que la contribution de l'écoulement de base à l'hydrogramme de crue, dans des conditions de précipitations analogues, est nettement plus faible dans la période actuelle et un effet "mémoire" de la sécheresse est évoqué dans le régime des fleuves soudano-sahéliens.



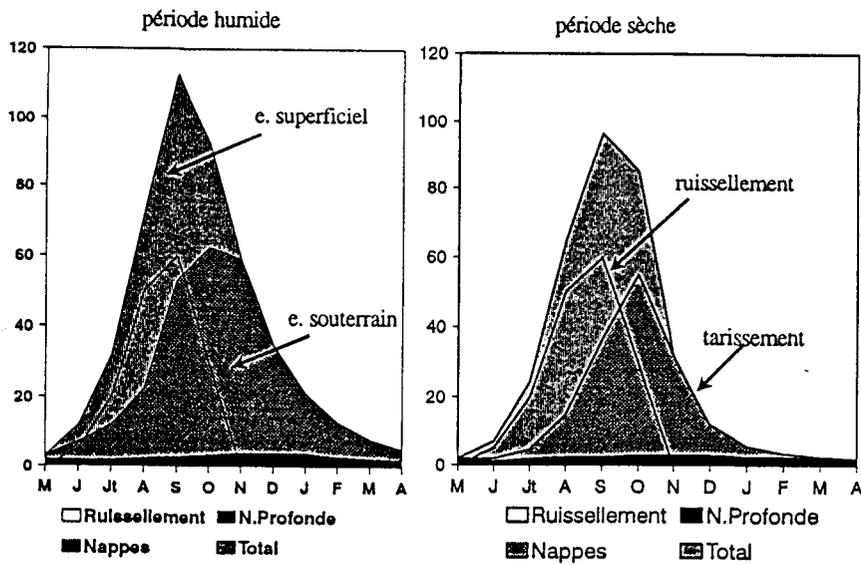
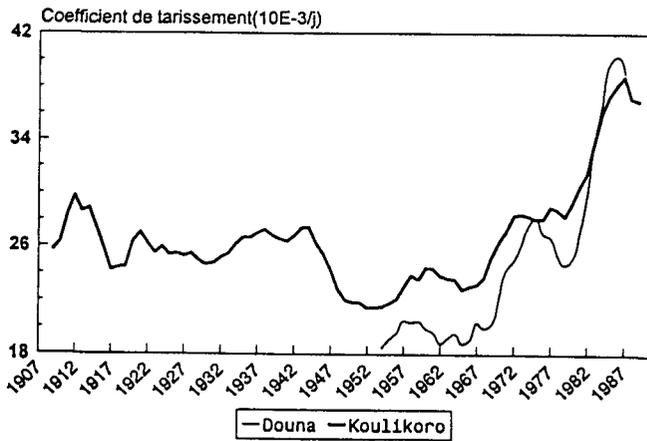
Variation de l'indice pluviométrique dans la zone soudanaïenne [d'après Lamb (1985) et Nicholson (1988) complété par Oliury (1992)] comparée à celle de l'hydraulicité du Niger (variable centrée réduite) : noter l'inertie de la réponse hydrologique par rapport aux précipitations des années récentes.

EVOLUTION DES DEBITS MOYENS MENSUELS (Année hydrologique) sur le Niger Supérieur





MOYENNE MOBILE SUR 5 ANS DU COEFFICIENT DE TARISSEMENT



Contribution de l'écoulement de base à l'hydrogramme de crue expliquant la persistance du déficit hydrologique (débits fictifs en ordonnées)

## **FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DE LA CUVETTE LACUSTRE DU NIGER ET ESSAI DE MODELISATION DE L'INONDATION DU DELTA INTERIEUR**

J.C. Olivry

### **Résumé :**

Vaste zone d'épandage des apports du Niger, la cuvette lacustre constituée par un delta intérieur inondable et un système complexe de lacs en rive droite et rive gauche couvre une superficie de plus de 50 000 km<sup>2</sup> suivant un rectangle orienté SO.NE de 450 km de longueur sur 125 km de largeur.

Le fonctionnement hydrologique de la cuvette lacustre du fleuve Niger est largement dépendant des conditions d'écoulement exogènes, l'essentiel des ressources en eau provenant des régions beaucoup plus arrosées de l'amont et donc des régimes hydroclimatiques des bassins supérieurs du fleuve Niger et du Bani, et des conditions morphologiques et climatologiques propres au Delta Intérieur, régissant les écoulements (défluences, inondations) et le bilan hydrologique (évaporation, infiltration).

Le régime des précipitations correspond pour la partie sud du Delta central au régime sahélien ; le nord de la cuvette est soumis au régime subdésertique. Les moyennes actualisées font apparaître sur l'ensemble de la région une baisse vers le sud des précipitations de 120 à 150 mm par rapport aux moyennes antérieures à la sécheresse. Ainsi la hauteur de précipitation interannuelle est passée à Mopti de 535 mm à 415 mm.

Les écoulements dans la cuvette lacustre s'organisent autour d'un réseau hydrographique complexe d'effluents, défluents et lacs. Les principaux axes d'écoulement s'organisent pour le Delta amont et central - en aval de Ké-Macina pour le Niger, de Douna pour le Bani et jusqu'au Lac Débo -, autour de deux branches majeures, le bras principal du Niger qui transite par Mopti où il reçoit le Bani et le bras secondaire du Diaka, effluent du Niger au niveau de Diafarabé, et pour la cuvette nord - du Lac Débo à Diré - avec trois axes drainants principaux, l'Issa Ber, branche majeure à l'ouest qui assure le transfert de 80 à 87% des sorties du lac Débo, le Bara Issa concerné par 12 à 10% des écoulements, le Kolikoli. De Ké-Macina à Diré, le Niger a parcouru environ 550 km et perdu seulement 12 m d'altitude, soit une pente moyenne de 2,2 cm par kilomètre.

L'examen des modules montre que les écoulements contrôlés à l'entrée du Diaka et après le confluent Mopti-Bani ont déjà perdu environ 18%, 14% et 6% des apports initiaux, suivant que l'on a une crue forte, moyenne ou faible. Les pertes sont d'autant plus importantes que les zones d'inondations augmentent, mais aussi que les effluents secondaires transfèrent des volumes plus importants. Par rapport aux entrées, les modules de Diré ont perdu environ 47%, 37% et 32%, de la crue forte à la crue faible.

Ce sont bien évidemment ces pertes et leur ampleur qui font la caractéristique hydrologique principale de la cuvette lacustre et, de celle-ci, une formidable machine évaporatoire en Afrique de l'Ouest. La chronique de ces pertes annuelles a été comparée à celle des entrées dans la cuvette lacustre. Une des autres caractéristiques importantes de l'hydrologie du Delta tient dans l'amortissement de la crue annuelle ; l'étalement des hydrogrammes, se traduit par un amortissement dans le temps et un décalage du maximum vers l'aval.

La comparaison des conditions hydrologiques dans le Delta en période humide et en période sèche a été faite sur deux périodes de cinq ans ; l'une, de 1962 à 1966, se situe pendant le "cycle" humide du Niger sans en exprimer les valeurs maximales; l'autre, de 1982 à 1986, est largement déficitaire et comprend l'année la plus déficitaire de la série (1984). Au niveau des entrées, le fait le plus caractéristique tient dans un appauvrissement des ressources en eau beaucoup plus marqué sur le Bani que sur le Niger : les modules du Bani sont dans le rapport de 5,3, contre 2,2 pour ceux du Niger.

L'étude des pertes annuelles montre que l'on passe de 29 km<sup>3</sup> entre les entrées et Diré pour la période humide, à 7 km<sup>3</sup> pour la période sèche soit un rapport de 4,14. Entre Diré et Tossaye, les pertes sont beaucoup plus réduites : près de 3 km<sup>3</sup> en période humide, 1 km<sup>3</sup> en période sèche (rapport de 3). Il est important de souligner que le rapport de 4 exprimant la diminution des pertes dans le Delta central traduit aussi la diminution de l'extension spatio-temporelle de l'inondation. On distingue une première période de progression de l'inondation avec des pertes correspondant à l'infiltration, à l'évaporation et surtout à un stockage de volumes importants dans les plaines d'inondation. Cette première période atteint son maximum en septembre et octobre pour les années humides (14 km<sup>3</sup> au mois d'octobre) et en septembre pour les années sèches, avec un peu moins de 5 km<sup>3</sup> de pertes. Le piégeage des eaux diminue rapidement en novembre et octobre, puis une période de restitution partielle des volumes piégés apparaît. C'est la vidange des plaines d'inondation.

Le bilan annuel des pertes est un bon indicateur de l'extension de l'inondation, les pertes étant pour l'essentiel consommées par évaporation. Dans le bilan hydrologique du Delta central interviennent aussi les précipitations et l'infiltration. Dans l'évaluation proposée, on suppose que les termes infiltration et précipitation sur les surfaces en eau sont du même ordre de grandeur ; les précipitations compensent l'infiltration dans le bilan annuel et les pertes totales peuvent être assimilées au bilan évaporatoire des

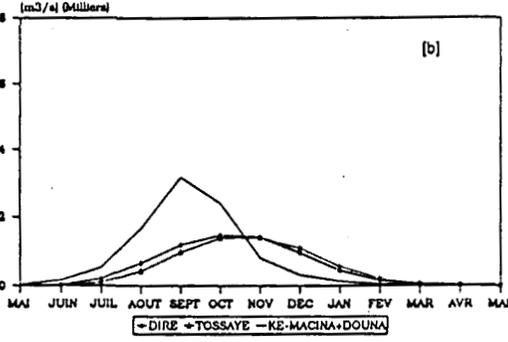
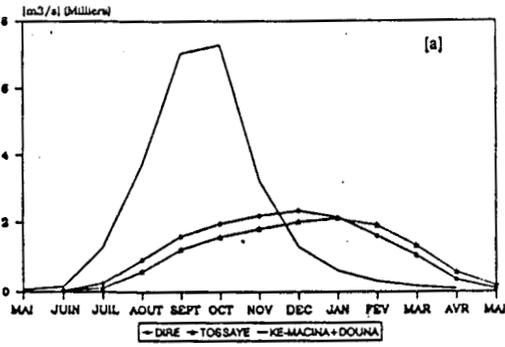
zones inondées. Une autre hypothèse consiste à imaginer un fonctionnement homogène du système hydrologique entre les zones sud et nord du delta et à supposer que la courbe des pertes montre à un instant  $t$  un point caractéristique pour lequel l'inondation a atteint son maximum : il n'y a plus stockage et pas encore restitution. On se trouve en situation d'étalement, les pertes correspondent à la seule évaporation. Ce point caractéristique coïncide bien évidemment avec le maximum de la crue. L'instant  $t$  choisi est celui du maximum observé à Mopti-Nantaka. Sur la base de ces hypothèses, trois années-type (humide, moyenne et sèche) ont été étudiées. Le graphe des pertes mensuelles et la date d'apparition du maximum à Mopti permettent de déterminer la perte mensuelle, centrée sur l'instant  $t_{max}$ , due à l'évaporation, et d'estimer la surface maximale d'inondation correspondante.

L'estimation des surfaces d'inondation des mois encadrant le maximum mensuel d'inondation est obtenue à partir d'une évaluation par approximations successives des pertes mensuelles par évaporation, basée sur la progression de la montée des eaux puis de la décrue et de telle sorte que le bilan annuel de l'évaporation corresponde aux pertes hydrologiques.

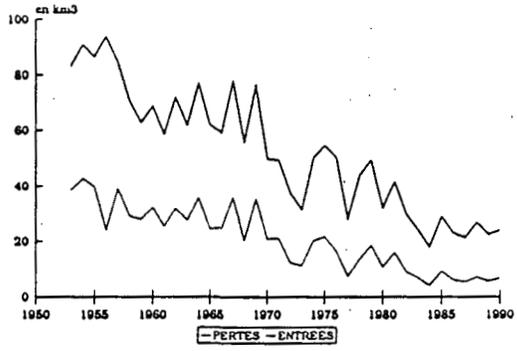
Les surfaces d'inondation maximale ont été corrélées aux volumes des entrées, aux pertes annuelles et à la hauteur maximale de la crue à Mopti-Nantaka. Les régressions sont toutes de bonne qualité.

Les résultats montrent pour les années de forte hydraulité des valeurs surestimées si on se réfère aux estimations faites sur carte de l'extension maximale de l'inondation dans la période contemporaine, plus proche de 35 000 que de 40 000 km<sup>2</sup> à Diré. Le modèle n'est donc plus adapté pour les très hautes eaux. Le remplissage des systèmes lacustres éloignés entraîne des pertes de volumes importantes dont l'épuisement par évaporation peut demander plusieurs années.

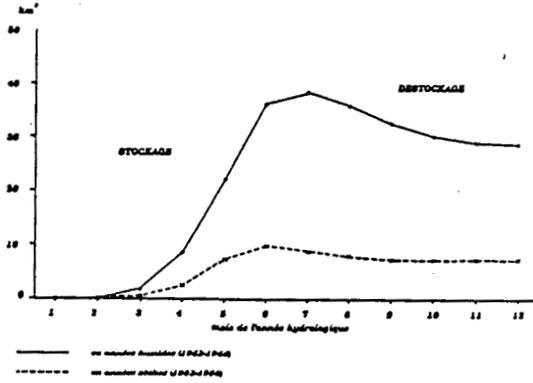
Il paraît difficile d'obtenir par d'autres méthodes un gain significatif dans la connaissance du régime de l'inondation annuelle du Delta central sur la seule base des données existantes et de l'analyse hydrologique traditionnelle. Des études complémentaires sur l'évolution des concentrations et des flux de matières dissoutes (entrées et sorties), sur l'évaporation sur nappe d'eau libre et des études appropriées en télédétection devraient cependant permettre de préciser le fonctionnement de la cuvette lacustre. Celles-ci sont d'ores et déjà entreprises dans le cadre du projet sur l'environnement et la qualité des apports du Niger au Sahel (EQUANIS).



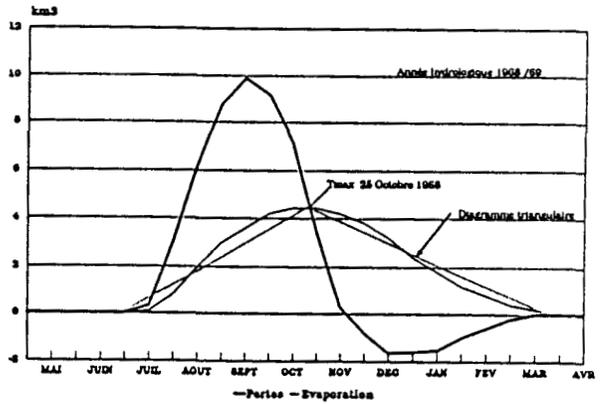
Hydrogrammes des débits mensuels des apports amont (Ké-Macina + Douna) et des sorties aval de Diré et Tossaye montrant l'amortissement de l'onde de crue dans le Delta Central pour une période humide, 1962 - 66 [a] et une période sèche, 1982 - 86 [b].



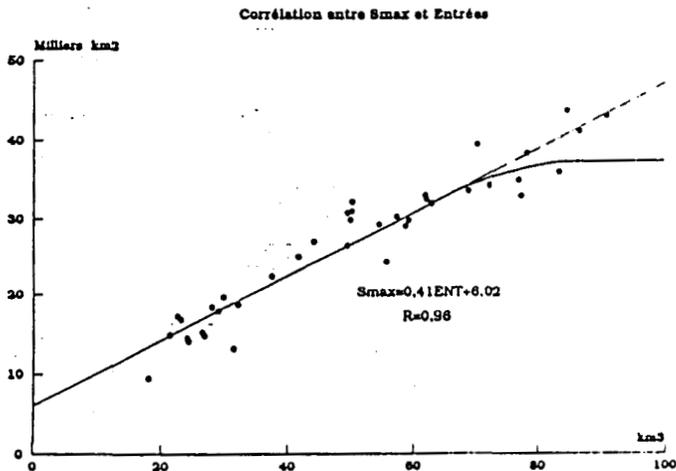
Evolution des volumes des apports annuels du bassin supérieur en milliards de m<sup>3</sup> (km<sup>3</sup>) mesurés sur Ké-Macina et Douna (entrées) et pertes correspondantes à l'aval du Delta Central (Diré).



Courbes cumulées moyennes des pertes mensuelles à Diré en km<sup>2</sup> pour les périodes humides (1962 - 1966) et sèches (1982 - 1986).



Exemple d'application du modèle Pertes / Evaporation dans le Delta Central avec détermination du volume mensuel évaporé au maximum de l'inondation ( $t_{max}$ ).



Exemple de corrélation: entre la superficie maximale d'inondation ( $S_{MAX}$ ), et le volume des apports amont (entrées).

*Programme sur l'Environnement de la Géosphère Intertropicale (PEGI) - INSU/ORSTOM  
Colloque "Grands Bassins Fluviaux" - 22, 23 et 24 novembre 1993 - PARIS*

## **PREMIERS RESULTATS SUR LA MESURE DES FLUX DE MATIERE DES APPORTS DU NIGER AU SAHEL**

J.C. Olivry, L. Gourcy, M. Touré

### Résumé :

Depuis 1990, le projet sur l'environnement et la qualité des apports du Niger au Sahel (EQUANIS) s'est attaché à mettre en place au Mali un réseau de stations d'observation des flux de matières particulaires et dissoutes en développant progressivement les thématiques de recherches du PEGI.

Les protocoles de mesure ont dû être adaptés aux conditions particulières du réseau hydrographique du Niger notamment dans la cuvette lacustre. La représentativité des contrôles journaliers a été vérifiée à partir de mesures complètes du débit solide.

Le régime des exportations de matières des bassins amont est étudié aux stations de Banankoro sur le Niger (régime naturel), de Koulikoro (influencé par le barrage de Sélingué) et de Douna sur le Bani. Les entrées dans la cuvette lacustre sont comptabilisées à Ké-Macina (après prélèvement de l'Office du Niger) et à Douna.

Un premier bilan des sorties du Delta central est fait à l'exutoire du Lac Débo. La station de Diré contrôle les sorties de l'ensemble du Delta intérieur.

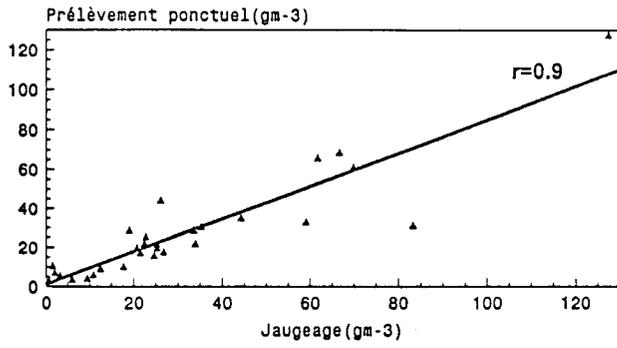
L'étude des matières en suspension dans les eaux des bassins supérieurs montre des variations saisonnières des concentrations caractéristiques des fleuves tropicaux. Les concentrations les plus élevées correspondent au début de la saison des pluies ; elles dépassent rarement 100 mg l<sup>-1</sup> pour le Niger et 200 à 250 mg l<sup>-1</sup> pour le Bani. Elles tombent en saison de basses eaux jusqu'à 5 mg l<sup>-1</sup> et compte tenu des débits, le transport de matière devient alors pratiquement négligeable. Les concentrations moyennes annuelles varient de 28 à 36 mg l<sup>-1</sup> pour le Niger, de 53 à 59 mg l<sup>-1</sup> pour le Bani. Le total des apports en suspension parvenant à la cuvette lacustre est de 1,2 million de tonnes en 1991, 1 million de tonnes en 1992. En termes d'érosion spécifique, les valeurs varient de 8,1 à 6,6 t km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> pour le Niger à Banankoro et de 3,2 à 2,5 t km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> seulement pour le Bani à Douna. Ces très faibles dégradations liées à la faible hydraulicité des cours d'eau doivent être rapprochées de celles du bassin actif du fleuve Sénégal dont la valeur moyenne est de 16,7 t km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> sur 9 années récentes déficitaires. L'importance relative plus grande du plateau Mandingue latéritique sur le bassin du Sénégal explique cette différence.

Dans la cuvette lacustre, le suivi saisonnier des transports en suspension a montré en 1992 le piégeage en amont du Lac Débo de 330 000 tonnes dans les zones d'inondation. Entre le Lac Débo et Diré, on a au contraire un excédent de 87 000 tonnes sur l'ensemble de l'année qui suggère des reprises de berges dues aux effets du vent et des apports de poussières en saison sèche. Sur l'ensemble du Delta Intérieur, l'exportation de tonnages excédentaires aux entrées est observée de décembre à juillet (restitution des zones inondées, reprise de dépôts antérieurs et poussières atmosphériques). En 1992, la sédimentation dans la zone d'étude aurait concerné un minimum de 244 000 tonnes d'argiles et limons. La quantification des apports atmosphériques est en cours d'étude.

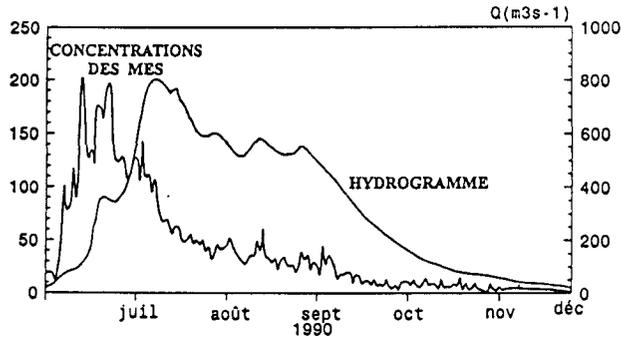
L'étude des transports de matière dissoute en termes de flux et de variations saisonnières montre sur les bassins amont des concentrations comprises entre 30 et 80 mg l<sup>-1</sup> pour le Niger à Banankoro, 20 et 100 mg l<sup>-1</sup> pour le Bani à Douna avec les plus fortes concentrations en fin de saison sèche et un minimum dès le début de la montée de la crue, période pour laquelle la phase de ruissellement est la plus intense. L'amplitude des variations de concentrations est moindre pour le Niger à Ké-Macina, les débits de saison sèche étant soutenus par le barrage de Sélingué. Le total des apports dissous à la cuvette lacustre est de 1,2 million de tonnes en 1992, soit une concentration moyenne de 50 mg l<sup>-1</sup>. Dans la traversée de la cuvette lacustre, le Niger a perdu à Diré 300 000 tonnes de matières dissoutes dont les 2/3 à l'amont du Lac Débo, sans tenir compte des apports dissous des précipitations. Ces pertes correspondent à la charge saline des volumes d'eau piégés par l'inondation du Delta Intérieur. Le suivi saisonnier montre une légère augmentation des concentrations en décrue à l'aval du Lac Débo qui pourrait indiquer une évaporation des volumes restitués ; de même, un léger excédent des charges dissoutes à Diré en début de crue est peut-être l'indice d'une reprise de dépôts salins de l'année antérieure. En fait, le fonctionnement de la cuvette ne pourra être précisé qu'à partir du suivi de la composition de la charge dissoute, évoqué par ailleurs, et d'un bilan des intrants d'origine météorique.

Avec le concours de l'AIEA, des analyses isotopiques de l'eau ont été faites sur le Niger et le Bani ainsi que sur les aquifères de la région. Le schéma général des variations montre une diminution rapide des teneurs en isotopes lourds (Oxygène 18 et Deutérium) au début de la saison des pluies. Un enrichissement apparaît sur le Niger dès le mois d'août et traduit la contribution à l'hydrogramme de crue de l'écoulement de base.

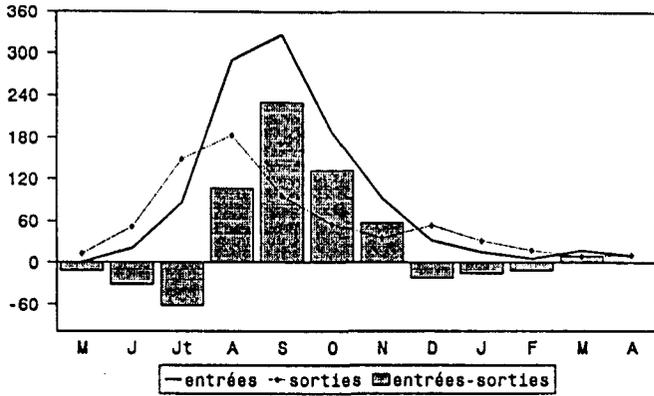
# Corrélation entre prélèvements à Koulikoro



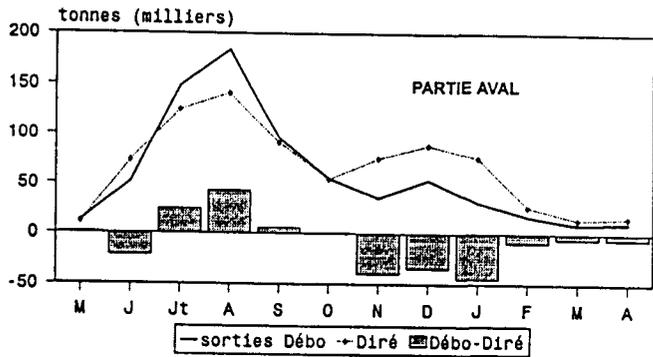
## BANI A DOUNA



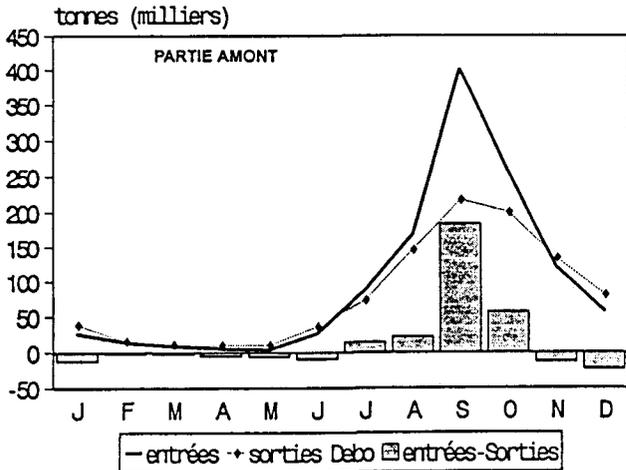
Bilan Mensuel des flux de  
Matières en Suspension du  
Delta Intérieur  
1992-93



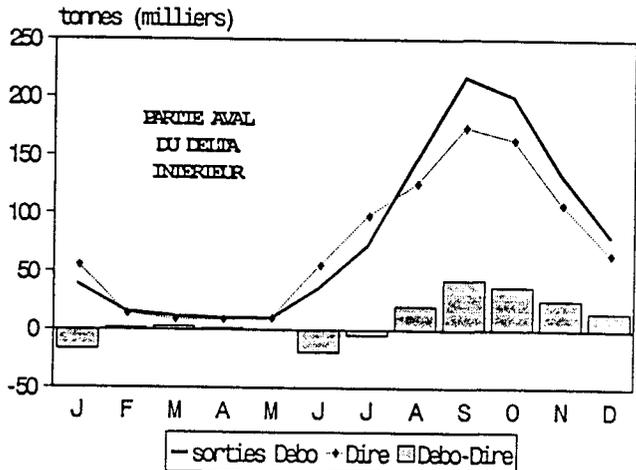
Bilan Mensuel des flux de  
Matières en Suspension du lac  
Débo à Diré  
1992-93



Bilan Mensuel des flux de  
Matière Dissoute du Delta  
Intérieur  
1992

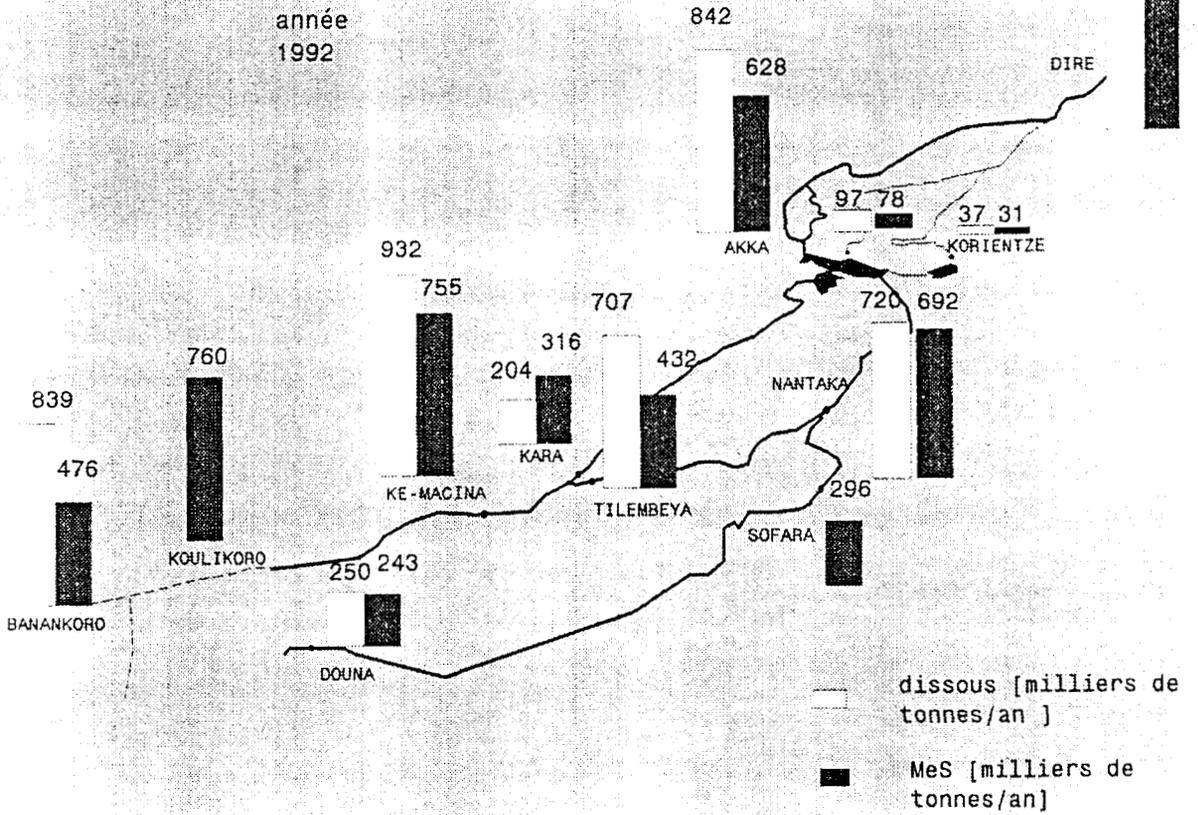


Bilan Mensuel des flux  
de Matière Dissoute du  
lac Débo à Diré  
1992

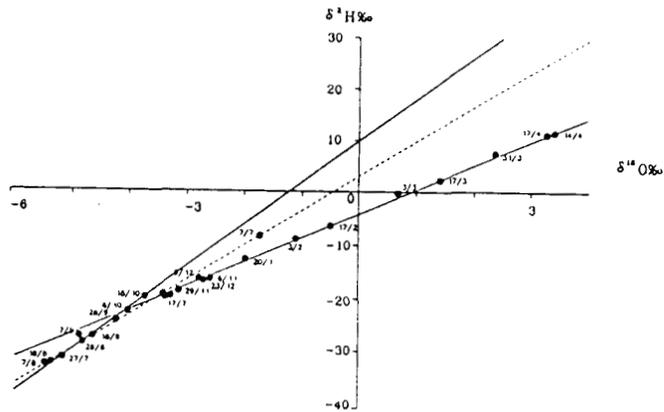


BILAN DES MATIERES DISSOUTES  
ET EN SUSPENSIONS

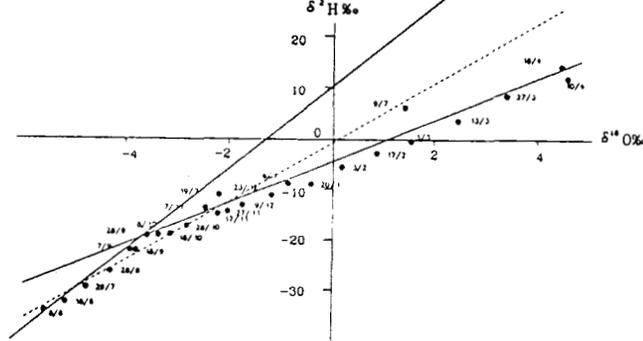
année  
1992



NIGER A Banakoro  
du 07/07/1990 au 17/04/1991



BANI A Douna  
du 09/07/1990 au 18/04/1991



— decrue  
- - - crue  
- · - · - eaux météoriques mondiales

**PREMIERS RESULTATS SUR L'EVOLUTION DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX  
DANS LA CUVETTE LACUSTRE DU FLEUVE NIGER (MALI) (année 1990-1991).**

*Laurence GOURCY (1) et Francis SONDAG (2)*

(1) Laboratoire d'Hydrologie, Centre ORSTOM - BP 2528 - Bamako, Mali

(2) Laboratoire des Formations Superficielles - 72, route d'Aulnay - 93143 Bondy

## I INTRODUCTION

L'étude physico-chimique des eaux du bassin intérieur du fleuve Niger se place au sein d'un vaste programme de recherche pluridisciplinaire lancé en 1990 sur l'Environnement et la Qualité des Apports du fleuve Niger au Sahel (EQUANIS). Ce programme s'articule autour de plusieurs pôles d'intérêts:

- l'estimation des apports solides et liquides du Niger au delta central,
- la modélisation du bilan hydrique dans le delta intérieur du Niger à partir des pertes en eau et de l'évolution des concentrations de la matière dissoute pour une détermination des relations surface inondée/durée d'inondation,
- la surveillance du milieu et de la qualité des eaux pour déceler les altérations majeures du système,
- l'établissement des relations entre la ressource renouvelable hydrique et les ressources renouvelables biotiques.

Les premiers résultats présentés ici portent sur l'évolution des concentrations de matière dissoute sur l'ensemble de la cuvette lacustre de juillet 1990 à juin 1991.

## II METHODOLOGIE UTILISEE

Depuis juillet 1990, plusieurs stations d'observation ont été mises en place sur divers bras du fleuve dans la cuvette lacustre. Les points d'échantillonnage ont été choisis afin qu'ils couvrent l'ensemble du bassin et de manière à ce qu'ils soient à proximité d'une échelle limnimétrique étalonnée relevée quotidiennement.

Un litre d'eau a été collecté sur chacune de ces stations à une fréquence mensuelle, décadaire puis hebdomadaire. Les prélèvements se font au milieu du cours d'eau à une profondeur de 60 cm. Après mesure des conductivités et du pH, les suspensions sont recueillies par filtration sur des membranes de 0,45 puis 0,22  $\mu\text{m}$  de taille de pores et pesées après passage à l'étuve. L'analyse du  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{Cl}^-$  se fait par chromatographie ionique, les cations majeurs par absorption atomique. Silice, fer et aluminium sont mesurés par spectrophotomètre à plasma avec une limite de détection de 50  $\mu\text{g.l}^{-1}$ . L'alcalinité est mesurée par titration à l'aide d'un acide fort (HCl).

Pour permettre le suivi d'une même masse d'eau à travers le bassin intérieur, les résultats obtenus ont été décalés dans le temps en tenant compte des distances entre les stations et de la vitesse de l'onde de crue. Le numéro 1 correspond à une eau prélevée à Banankoro le 2 juillet 1990 et dont l'arrivée à Dire est estimée au 17 août. La numérotation se fait par période de 5 jours.

## III HYDROLOGIE

La station de Banankoro représente l'entrée du fleuve Niger au Mali. Entre cette station et la station de Koulikoro se jette le Sankarani dont les débits sont régis par le fonctionnement du grand barrage hydroélectrique de Selingue. Entre Koulikoro et Ke-Macina apparaissent les grandes zones agricoles de l'Office du Niger qui utilisent une partie du débit du fleuve. Ke-Macina représente donc les entrées dans le delta intérieur. Sur le Bani, entre Douna et Sofara, de nombreux bras partent rejoindre le Niger en amont de Nantaka. La station de Douna qui se situe en amont de la zone d'inondation a donc été préférée pour le calcul des bilans solides et liquides.

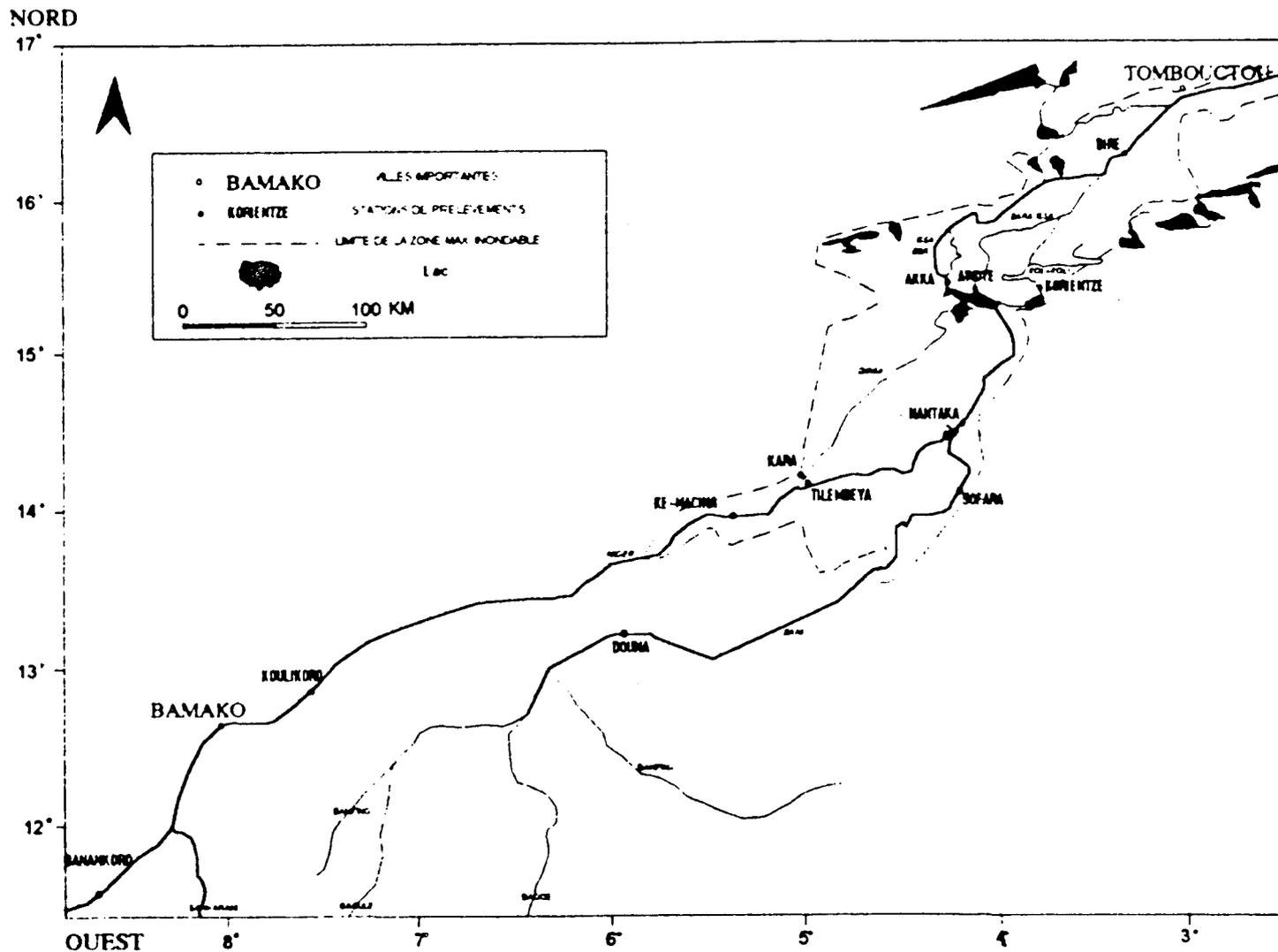
Pour l'année 1990-1991, le Bani, avec 155  $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$  représente 21% des entrées liquides et le Diaka détourne, en amont de la jonction des deux fleuves, 157  $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$  soit 26% du débit du Niger.

Dans le delta, les trois stations qui ont été prises en compte à la sortie du lac Debo sont Akka, Awoye et Korientze qui représentent respectivement 558  $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ , 61  $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$  et 21  $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$  de débit moyen annuel soit 87 %, 10 % et 3 % des débits liquides. A la sortie du delta, sur la station de Dire, des débits de 546  $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$  soulignent que 26% des eaux entrées se sont évaporées, ce qui représente annuellement 6.2 milliards de  $\text{m}^3$  d'eau.

## IV PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

Les eaux du Niger entre Ke-Macina et Dire sont très peu minéralisées. La conductivité varie sur le Bani (Douna) de 22 à 130  $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$  avec une moyenne annuelle de 70  $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$ . A l'entrée du Niger au Mali, à Banankoro, les conductivités varient de 33 à 86  $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$  avec une moyenne annuelle de 50  $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$ . Les stations avec les plus faibles débits présentent les plus grandes variations (26,7 à 109  $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$  à Kara). La conductivité s'élève régulièrement durant l'étiage et chute brutalement avec les premières pluies et la montée de la crue. L'augmentation des conductivités est due à la forte évaporation régnant sur la cuvette lacustre pendant la saison sèche et à la transpiration des végétaux.

Le pH des eaux est toute l'année légèrement basique, compris entre 7 et 8. Le Bani présente des pH allant de 7,1 en août à 7,9 en mai-juin. La moyenne est 7,5 alors qu'elle est de 7,3 sur le Niger à Banankoro. Les pH les plus basiques s'observent en période d'étiage. Les valeurs extrêmes observées vont jusqu'à 8,3 à l'étiage (Nantaka) et 6,7 en crue (Koulikoro).



carte de positionnement des stations de prélèvement

## V EVOLUTION DE LA CHIMIE DES EAUX SUR L'ANNEE

La silice représente entre 9 et 38% du poids total des éléments dissous. Ces fortes teneurs s'expliquent par la géologie du bassin traversé par le fleuve. La température élevée de l'eau augmente la solubilité de la silice.

Les bicarbonates représentent de 41 à 68 % des éléments dissous. L'apport est essentiellement atmosphérique et peut provenir également de l'oxydation de la matière organique qui s'accompagne d'une augmentation de la teneur en bicarbonates et en protons.

Une partie du sodium a une origine non atmosphérique puisque le chlore se trouve en plus faible proportion. Les teneurs en sulfate et nitrates ne sont pas significatives vu le temps de stockage des échantillons.

Les sulfates et nitrates ne représentent que 0 à 2%,  $Al_2O_3$  et  $Fe_2O_3$  sont toujours inférieurs à 1%.

La proportion de chaque élément reste voisine toute l'année. Seuls les bicarbonates augmentent d'importance à l'étiage au détriment de la silice. Les pH sont alors nettement plus basiques.

La concentration en éléments dissous augmente régulièrement durant la saison sèche puis, dès le début de la crue, diminue rapidement. Les eaux se concentrent ensuite lors de la décrue. Les éléments  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$  et  $HCO_3^-$  sont bien reliés aux débits ( $R < -0.84$ ).  $Mg^{2+}$  évolue également inversement au débit mais leur corrélation est moins bonne. Les ions chlorure, potassium et la silice ont une évolution non reliée aux débits.

## VI EVOLUTION A TRAVERS LE DELTA

### VI 1 Etude des concentrations

Par rapport au Niger, les eaux du Bani ont des concentrations en calcium et bicarbonate plus fortes et des concentrations en silice et sodium plus faibles. La silice ne représente pas plus de 25% des éléments dissous.

L'étude des teneurs en minéraux dissous montre une évolution annuelle différente selon les stations.

Sur les stations de Banankoro, Ke-Macina et Douna l'augmentation des concentrations commence avant que la crue n'ait atteint son maximum. La nappe superficielle et le sous-écoulement de surface influencent la qualité des eaux. Il y a évaporation sur la partie supérieure de la nappe durant la saison sèche. Les premières eaux de pluies qui s'infiltrent lessivent un sol surconcentré. Ces deux types d'eaux arrivent avec un léger retard sur la crue. A Nantaka et à Akka, l'augmentation des concentrations en éléments dissous commence alors que le maximum de crue est déjà passé. On pourrait penser que sur les stations aval du delta l'importance de l'évaporation sur la nappe superficielle, sur les marais et lacs entraînerait un décalage entre la crue et l'augmentation des concentrations en éléments dissous. Ceci ne s'observe pas mais le peu de valeurs (2) sur cette courte période du début de la crue ne permet pas de tirer de conclusions définitives.

### VI 2 Bilan des matières dissoutes

Les bilans ont été calculés sur une période recouvrant les numéros 1 à 73, correspondant aux dates du 2 juillet 1990 au 30 juin 1991 à Banankoro. Etant donné la faible minéralisation des eaux des deux fleuves et le temps de stockage des échantillons avant filtration, seuls les éléments tels le bicarbonate, le calcium, le sodium et la silice ont été pris en compte. Les exportations totales de matières dissoutes aux sorties du lac Debo s'élèvent à  $10,3.10^5$  tonnes/an.

#### *VI 2 1 Bilan des bicarbonates*

Entre les entrées (Ke-Macina et Douna) et les stations de Akka, Awoye et Korientze il y a un excès de bicarbonate de 18 800 tonnes sur l'année étudiée. Cet excès ne représente que 4% des entrées et n'est donc pas très significatif.

Les stations intermédiaires (Kara et Nantaka) montrent un déficit par rapport aux entrées de 29 000 tonnes (soit 6%) et un déficit de 44 000 tonnes par rapport aux sorties (8.5%). L'étude de l'évolution du bilan des entrées moins les sorties à l'échelle de la décade montre qu'en basses eaux, les volumes transportés sont très faibles. Au début de la crue, en mai à Banankoro, les eaux à l'entrée sont peu minéralisées alors qu'elles ont été enrichies à la sortie durant la saison sèche. Il y a ensuite dilution des eaux à l'aval et augmentation des débits amont avec des apports aux entrées plus importants. Ceci se retrouve pour tous les éléments chimiques étudiés.

#### *VI 2 2 Bilan du sodium*

Le bilan pour le sodium montre un équilibre entre les entrées et les sorties avec une différence de 4% qui ne peut être significative sur l'ensemble des mesures. Sur les stations intermédiaires, les pertes par rapport aux entrées sont de 2 500 tonnes (4%). Le Bani et le Niger ont des teneurs similaires en sodium. L'évolution entre les différentes stations est faible.

#### *VI 2 3 Bilan du calcium*

L'étude du bilan du calcium, élément qui ne subit pas d'interaction avec l'atmosphère et le milieu montre un pseudo-équilibre sur l'année d'observation. Il y a, au niveau de Kara-Nantaka, une perte de 13% de calcium. Entre les stations intermédiaires et la sortie on note un gain de 19%.

#### *VI 2 4 Bilan de la silice*

L'analyse du transport de silice dissoute est plus significative car les teneurs observées dans les eaux du delta sont plus fortes. Toutefois des problèmes de mesure et de trop forte variation en l'espace de peu de temps relativisent le bilan. Il y a un déficit à la sortie de 18 000 tonnes (soit 6% des entrées). Entre l'entrée et les stations de Nantaka-Kara le gain de silice est de près de 19%. Par contre, entre les stations intermédiaires et les trois sorties du lac Debo il y a une perte de 21%.

## VII DISCUSSION

L'évolution des concentrations est régulière depuis l'entrée du Niger au Mali jusqu'aux sorties du lac Debo. Les bilans à Banankoro ne peuvent être utilisés car les eaux du Sankarani débouchant en aval de cette station ne sont pas étudiées.

Le bilan pour les quatre éléments dissous étudiés montre un équilibre entre les apports au delta et les sorties. Pour le bicarbonate, au début de l'inondation, la surface d'échange entre l'atmosphère et l'eau est importante et permet l'assimilation des bicarbonates par les eaux. Toutefois les faibles variations (4% maximum) sont comprises dans les erreurs de mesure des éléments chimiques et des débits.

Il semble que le bilan sur les stations intermédiaires de Kara (séparation du Niger et du Diaka) et de Nantaka (confluence entre le Niger et le Bani) ne soit pas exact. Alors que les bilans annuels s'équilibrent sur l'ensemble du bassin, ils ne le sont pas au niveau des stations intermédiaires. Pour le sodium et le bicarbonate ces stations montrent un déficit par rapport aux entrées et aux sorties. Pour la silice le fait inverse se produit. Ces fortes variations laissent penser que les valeurs obtenues pour Kara et surtout Nantaka (79% du débit liquide) sont surévaluées ou sous-évaluées. Le Bani a des concentrations plus faibles en silice et plus fortes en bicarbonate et calcium. Ceci tend à montrer que les prélèvements d'eau à Nantaka sont faits dans le Niger alors que les deux fleuves ne sont pas totalement mélangés. La mesure des débits sur cette station tient compte des deux fleuves.

## VIII CONCLUSIONS

Après une année d'observation sur les stations du delta et la station amont de Banankoro, il ressort que la complexité et la diversité du réseau hydrographique dans cette région sahélienne ne permettent pas une étude très détaillée de la zone d'inondation. Deux secteurs peuvent être distingués, l'aval et l'amont du lac Debo. Les entrées sont alors Douna et Ke-Macina, les sorties du Debo, Akka, Awoye et Korientze et la sortie du delta est représentée par la station de Dire, étudiée à partir de novembre 1991. Actuellement, l'inondation se fait essentiellement sur la partie amont du Debo et notamment le long du Diaka.

Les stations secondaires comme celles de Awoye ou Korientze ont des courbes de tarage non univoques. Le problème de mesure de débits liés aux faibles pentes des sections du fleuve entraîne des inexactitudes dans les relevés. Le faible nombre de jaugeages sur ces stations entraîne des erreurs lors du calcul des bilans ou les débits ont une part importante.

L'effet de l'évaporation est un facteur prédominant. Les faibles teneurs en éléments dissous et leur variation peu importante ne permettent pas une analyse fine du fonctionnement du delta. Les apports atmosphériques et les liens avec la nappe superficielle sont masqués du point de vue chimique à l'échelle d'étude adoptée.

Le calcium pourrait permettre de caler d'éventuels modèles de fonctionnement hydrologique et hydrochimique des apports du Niger au Sahel.

Afin de mieux cerner le fonctionnement hydrochimique du delta intérieur et de calculer des modèles de dilution, l'observation sur les stations principales doit être maintenue avec une fréquence régulière surtout durant la crue.

**LES APPORTS DETRITIQUES TERRIGENES  
DANS LA CUVETTE LACUSTRE DU NIGER  
ENTRE MOPTI ET KONA (République du Mali)**

**Claude CENSIER (1), Jean Claude OLIVRY (2), Jean Pierre BRICQUET(2)**

*(1) Centre ORSTOM de Bangui (République centrafricaine)*

*(2) Centre ORSTOM de Bamako (République du Mali)*

Un échantillonnage d'alluvions a été effectué au niveau des berges du Niger entre Bamako et Ségou, des berges du Bani au niveau de Douna, San et Sofara, et enfin dans la cuvette lacustre entre Mopti et Kona à l'aide d'un cylindre de type Berthois (fig. 1). L'analyse sédimentologique de tous ces échantillons permet de préciser les apports détritiques terrigènes dans la partie supérieure de la cuvette lacustre entre Mopti et Kona.

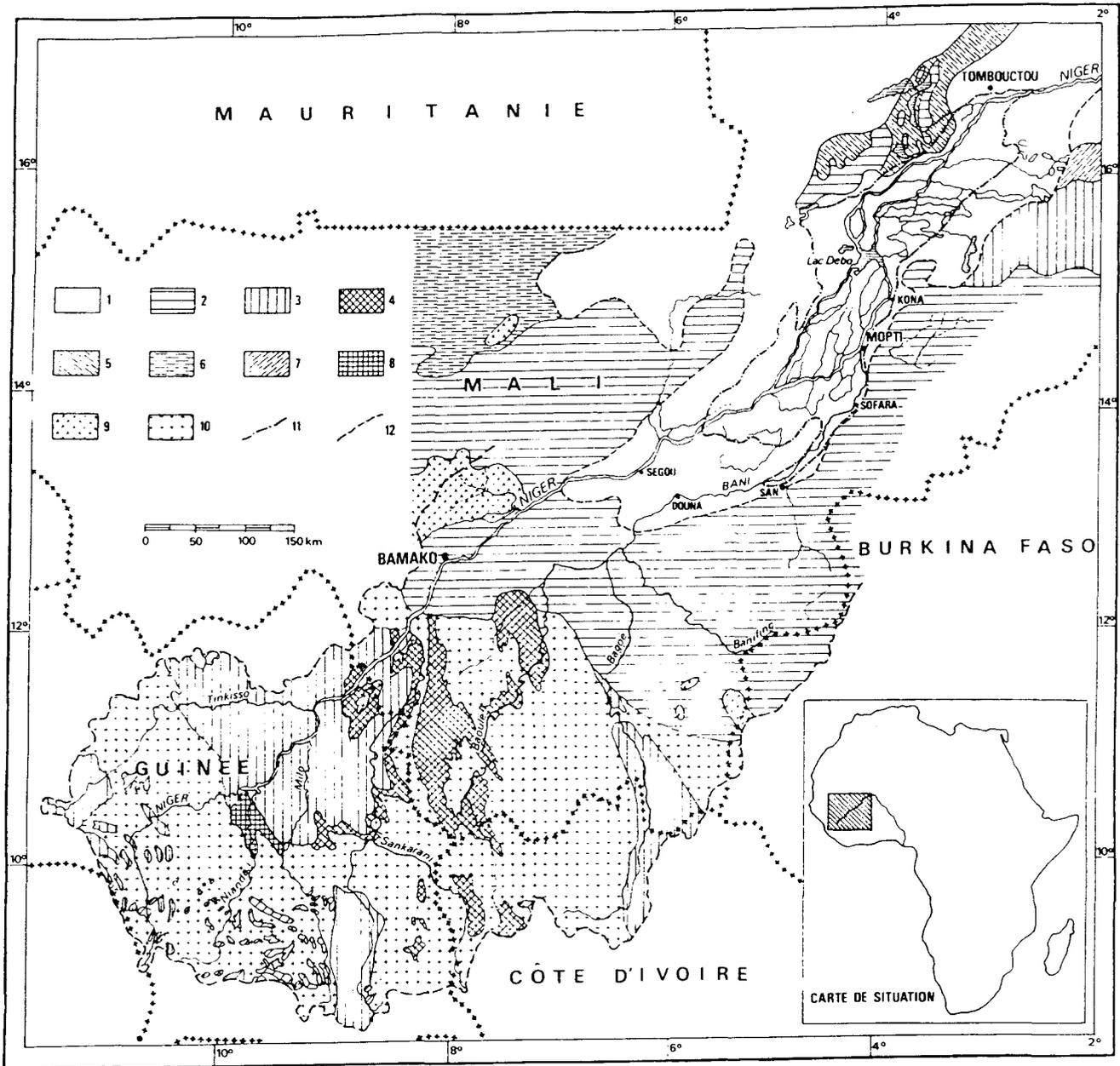
#### 1°. Les apports fluviatiles

- La fraction sableuse des alluvions de la cuvette est issue pour partie du démantèlement des grès horizontaux cambro-ordoviciens et pour partie du démantèlement des formations situées vers l'amont des bassins du Niger et du Bani (ensemble granito-gneissique et formations birrimiennes) (fig. 1). L'étude comparée des cortèges minéralogiques par analyse factorielle des correspondances montre que le matériel détritique est principalement apporté par le Bani (fig. 2), probablement principalement par les affluents de sa rive droite entre San et Mopti.

- La fraction argileuse des alluvions de la cuvette est composée de kaolinite (50%), d'illite (20%) et de montmorillonite (30%). L'illite et la kaolinite constituent l'héritage détritique des sols des bassins supérieurs du Niger et du Bani sous climat tropical humide. La montmorillonite n'apparaît que dans les alluvions du Niger et du Bani appartenant au domaine sahélien. Elle constitue l'héritage détritique des sols dans lesquels elle a été néoformée par bisiallisation.

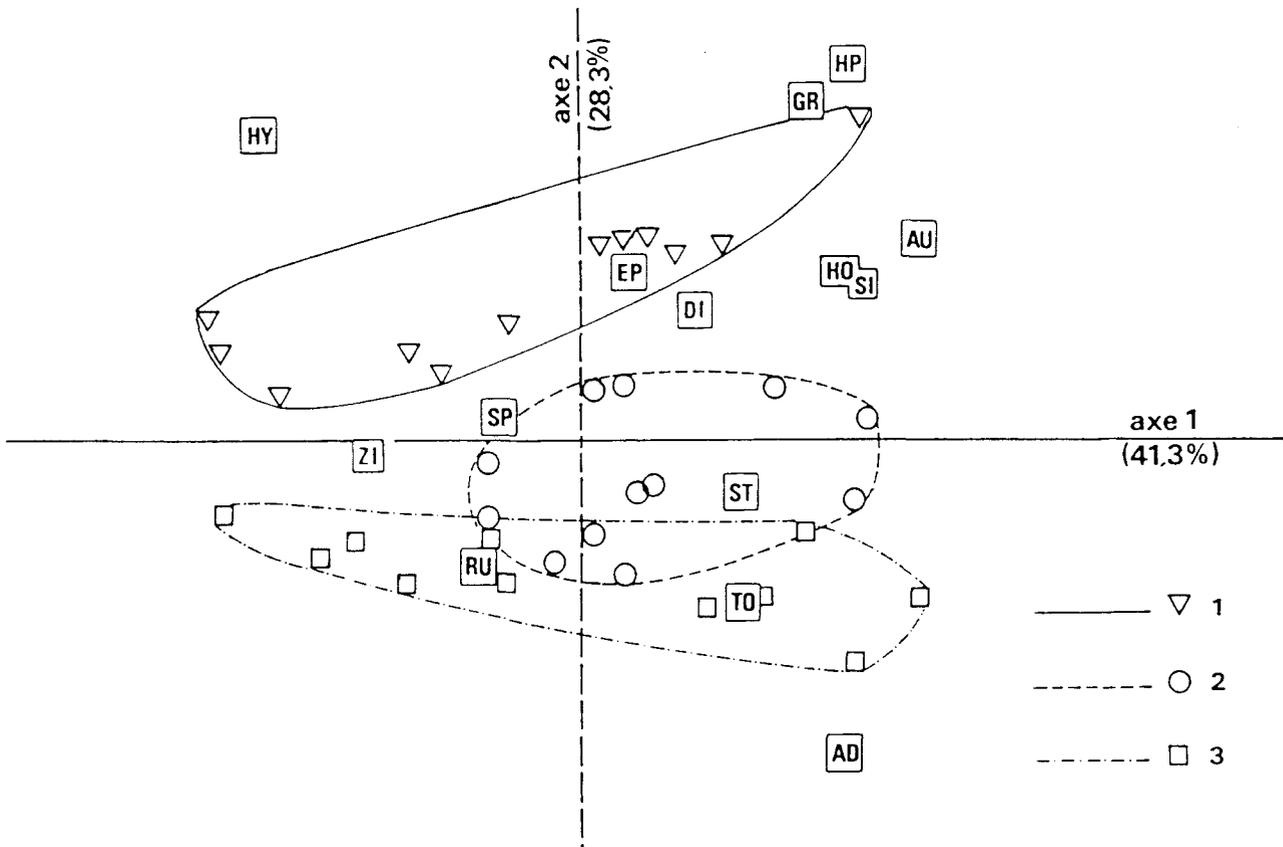
#### 2°. Les apports et remaniements éoliens

La fraction d'origine éolienne du matériel détritique de la partie supérieure de la cuvettelacustre est constituée de sables (fig. 3) et d'argile poudreuse. Cette fraction provient très probablement de la déflation des grands ergs situés au nord de la cuvette et a été transportée par l'Harmattan.



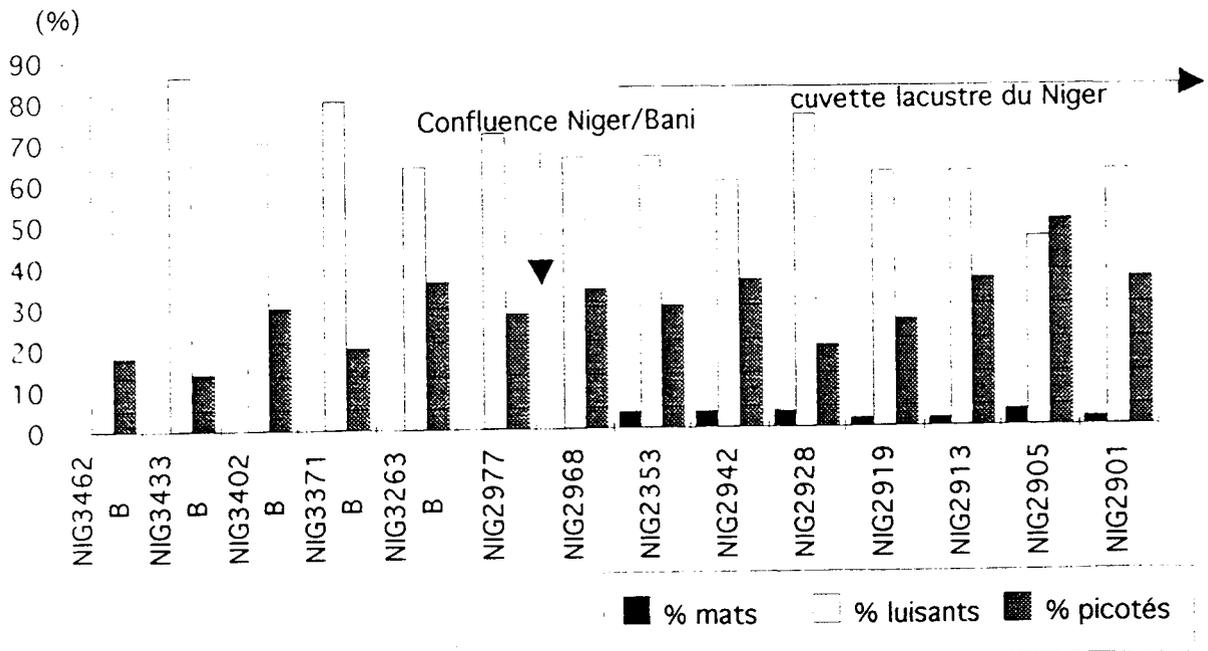
**Figure 1 : Géologie de la cuvette lacustre du Niger et de son bassin versant**

1 : Continental Terminal et alluvions quaternaires - 2 : Grès horizontaux cambro-ordoviens - Formations birrimiennes : 3 : Schistes et quartzites ; 4 : Micaschistes ; 5 : Schistes infracambriens ; 6 : Schistes de Nara ; 7 : Schistes de Gourna - 8 : roches vertes - 9 : dolérites - 10 : Ensemble granito-gneissique - 11 : Limites de la cuvette lacustre - 12 : Limites du bassin versant du Niger Supérieur



**Figure 2 : Traitement des données minéralogiques par analyse factorielle des correspondances (AFC)**

1 : points échantillons du Niger supérieur - 2 : points échantillons de la cuvette lacustre - 3 : points échantillons du Bani



**Figure 3 : Evolution morphoscopique des sables du Niger**

R. GALLAIRE

**DONNÉES SUR LES TRANSPORTS SOLIDES  
EN SUSPENSION** *Y. Samil d'Almeida*  
**DU NIGER MOYEN A KANDADJI ET NIAMEY**

**I. Situation et contexte de l'étude à l'aval de la "Cuvette Lacustre ":**

Le projet de barrage sur le site de Kandadji motiva une recherche hydrologique qui fut confiée à l'ORSTOM. Cette étude, qui s'effectua sur cinq ans de 1976 à 1981, avait entre autre pour but d'évaluer, comme dans tout projet de retenue, l'importance du transport solide en suspension responsable de l'envasement de l'ouvrage.

– Sur les quatre cents kilomètres qui le séparent du "Delta Intérieur" le fleuve Niger, au site de Kandadji, ne reçoit qu'un seul affluent, le Gorouol, dont le bassin versant atteint 45000 km<sup>2</sup>. La première phase de contrôle des suspensions entre 1976 et 1981 s'effectuera donc sur le Niger à Kandadji et sur son affluent à Dolbel.

Postérieurement à l'étude contractuelle les mesures seront poursuivies à l'ORSTOM dans le cadre de la formation; jusqu'en 1983 à Kandadji, et de 1984 à 1986 à Niamey.

– Le site de Niamey à cent quatre vingt kilomètres en aval de Kandadji intègre deux affluents supplémentaires en rive droite; le Dargol et la Sirba, qui comme le Gorouol sont issus des molles ondulations, en partie ensablées, du Liptako Voltaïque . Ces bassins présentent aussi de nombreux phénomènes d'endoréisme, mais situés à plus basses latitudes que celui du Gorouol ils connaissent une pluviosité plus abondante. L'importance de leur superficie, Dargol 7200 km<sup>2</sup> et surtout Sirba 39000 km<sup>2</sup>, constitue une potentialité d'apports liquides et solides au Niger importante; d'autant qu'elle survient de Juillet à Septembre au moment où les débits du fleuve sont encore faibles, les eaux de Guinée commençant seulement à arriver sur cette section du fleuve.

**II. Caractéristiques des mesures et des traitements:**

Au total, 1300 échantillons ont été prélevés aux trois stations observées, et une douzaine de jaugeages complets ont été réalisés, permettant de valider la masse de prélèvements ponctuels.

L'importance relative accordée aux "fines" qui ressort de la filtration à dix microns des échantillons prélevés de 1976 à 1986 trouve son explication dans la définition des objectifs de départ; l'estimation de la vitesse de colmatage de l'ouvrage et par la suite la volonté de transmettre avant tout une technique de terrain aux stagiaires.

Le souci de définir l'erreur commise en limitant la filtration à dix microns conduisit à effectuer à Niamey une nouvelle série de prélèvements entre Novembre 1992

et Avril 1993. Le traitement de la totalité de l'échantillonnage par étuvage permit d'obtenir, contrairement à la technique filtration-étuvage, la totalité de la suspension. L'analyse granulométrique fine dans la gamme 0-800  $\mu$  grâce au Coulter laser permit de montrer que les "fines" inférieures à dix microns présentaient une grande constance tout au long de la période (comme le laissait supposer la régularité du test de Secchi) et que leur volume n'atteignait, dans la plupart des cas (fig.1), que dix à quinze pour cent de celui des échantillons.

Le souci de l'aménageur de vérifier l'agressivité des eaux vis à vis des matériaux (ciments) amena à définir la composition chimique du milieu tout au long d'une année hydrologique; permettant par la même d'estimer l'importance de la charge dissoute.

### III. Les résultats:

#### 1) Les concentrations:

Malgré un trouble important les concentrations restent modestes toute l'année sur le fleuve où les valeurs ponctuelles excèdent rarement 1 g/l (à Kandadji comme à Niamey) au moment des apports d'hivernage des affluents (fig.2).

Les valeurs minimales (< 30 mg/l) se situent hors influence sahéenne, en début de décrue (Décembre-Janvier).

Sur les affluents les concentrations sont nettement plus élevées, comme en témoignent les 6 g/l relevés sur le Gorouol en 1978. La valeur moyenne interannuelle des concentrations sur cet affluent (750 mg/l), qui doit être assez représentative de celles existant sur le Dargol et la Sirba, permettent d'expliquer le doublement des concentrations moyennes interannuelles observées entre Kandadji (108 mg/l) et Niamey (206 mg/l).

L'anomalie de la remontée des concentrations sur le fleuve en pleine phase de décrue, au cœur de la saison sèche (Janvier-Mars), a permis de mettre en évidence le rôle des aérosols durant cette période de l'année.

#### 2) Importance relative des transports dissous:

Compte tenu de la faiblesse des concentrations de matières en suspension, celles des matières dissoutes prennent une valeur particulière.

L'étude menée sur l'année 80-81 montre que la concentration moyenne de la suspension ne représente que 71 pour cent du transport. Il existe cependant au cours de l'année de fortes disparités qui permettent même aux valeurs de concentration de matières dissoutes de prendre l'avantage. C'est le cas en fin de tarissement du fleuve, d'Avril à Juin, où les fortes températures favorisent les phénomènes d'hydrolyse (fig.3). Les valeurs de suspension apparaissent naturellement les plus élevées en hivernage, au moment où les affluents apportent leur contribution.

### 3) les masses transportées;

Les débits et les concentrations étant plus élevés à Niamey qu'à Kandadji du fait de la présence des affluents Dargol et Sirba, la masse annuelle transportée à Niamey (3,5 millions de tonnes) représente un peu plus de deux fois celle de Kandadji (1,6 Millions de tonnes). Mais encore une fois cette valeur brute cache de grandes variations saisonnières:

. Durant l'hivernage, période d'influence des émissaires sahéliens, le transport apparaît nettement supérieur à Niamey;

. Hors période d'écoulement des affluents le transport devient légèrement supérieur à Kandadji; cela montre que le fleuve, sur ce bief, perd alors de sa compétence.

fig.1 NIAMEY Granulométrie du 21/12

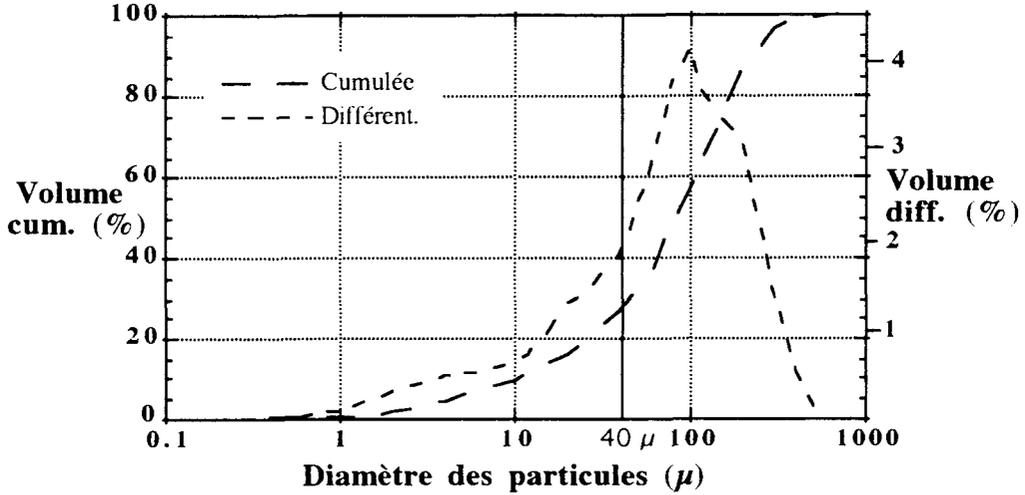


fig.2 Concentrations à KANDADJI et NIAMEY

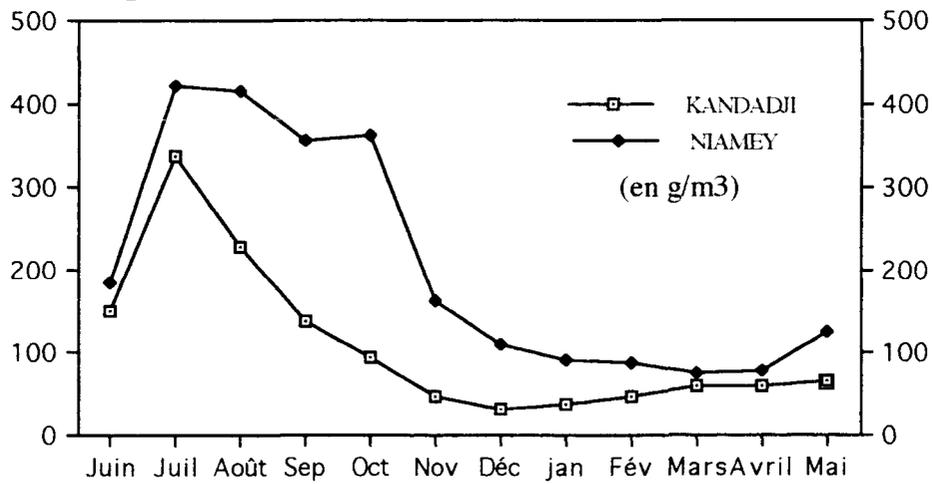
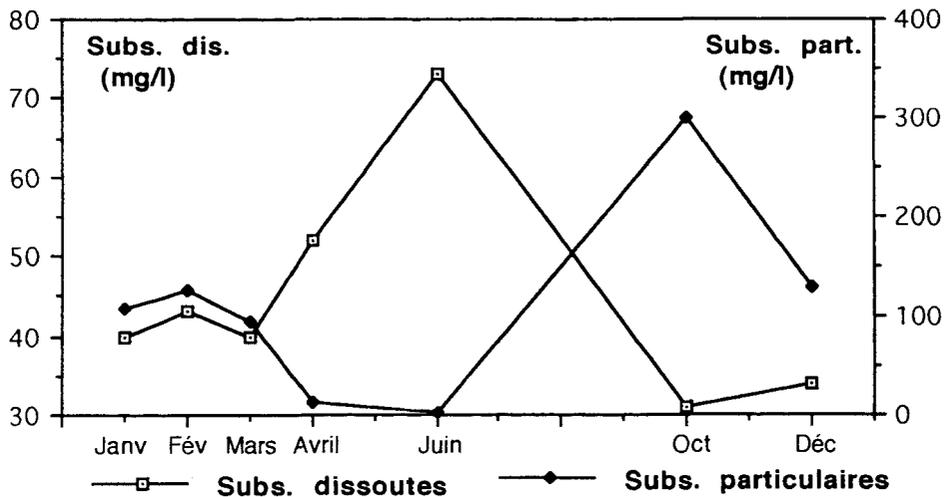
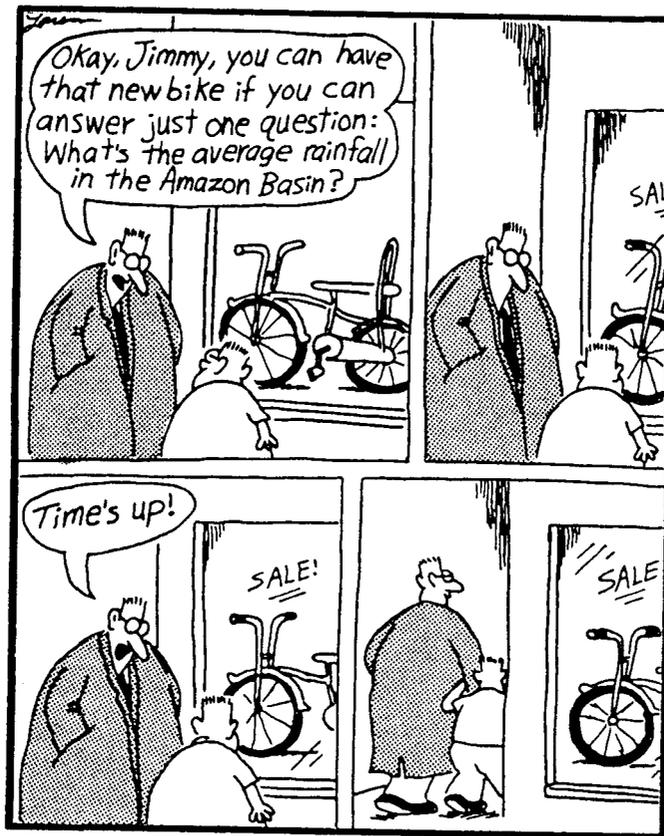


fig. 3 KANDADJI 1980-1981  
Concentrations des substances dissoutes et particulaires



# - BASSIN AMAZONIEN



Colloque Grands Bassins Fluviaux, PEGI, Paris, 22-24 Novembre 1993

## **Hydrologie du bassin de l'Amazone.**

**Michel MOLINIER & Jean Loup GUYOT, ORSTOM Brasília  
Valdemar GUIMARÃES & Eurides de OLIVEIRA, DNAEE Brasília**

### **Résumé :**

Le bassin de l'Amazone, le plus important des fleuves de la planète en terme de surface drainée et de débit, couvre  $6.1 \cdot 10^6 \text{ km}^2$  (près de 5% des terres émergées) et apporte à l'Atlantique un volume d'eau qui représente environ 20% des apports hydriques aux océans. Le bassin amazonien est divisé en trois grandes unités morpho-structurales héritées de l'histoire géologique du bassin : les boucliers, la chaîne des Andes et la plaine amazonienne, qui occupent respectivement 44%, 11% et 45% de la superficie totale du bassin versant. Les deux fleuves d'origine andine (Rio Marañón-Solimões et Rio Madeira) signent leurs apports à l'Amazone par des eaux chargées en matières dissoutes et particulières.

Le calcul du débit de l'Amazone, mais aussi celui de ses principaux tributaires, est compliqué par la très faible pente du cours d'eau, qui ne dépasse pas  $2 \text{ cm.km}^{-1}$  et les fortes vitesses observées. Il ne s'agit pas d'un écoulement classique d'amont vers l'aval, mais d'une poussée par l'onde de crue des fleuves d'origine andine. Aussi, les relations hauteurs-débits ne sont jamais univoques, et présentent des courbes en forme de lasso qui sont une fonction du gradient hydraulique.

79

Le programme HIBAM (Hidrologia da Bacia Amazônica : DNAEE/CNPq - ORSTOM) a commencé en 1982 une étude sur l'hydrologie du bassin amazonien, en focalisant ses recherches sur : 1. la réalisation de jaugeage précis par exploration complète du champ des vitesses dans la section de quelques stations clés, 2. l'établissement de courbes de tarage tenant compte du gradient limnimétrique, 3. la critique et l'homogénéisation des données hydro-climatiques du DNAEE par la méthode du vecteur régional, permettant le calcul de bilans hydriques précis par sous-bassins, 4. la télétransmission satellitaire de données hydrologiques.

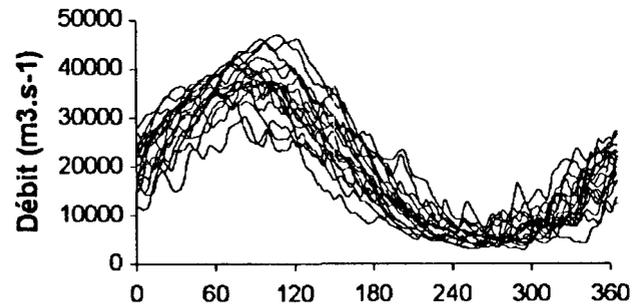
Les résultats obtenus ont permis de connaître les régimes hydrologiques de chaque tributaire de l'Amazone, d'en évaluer les variations inter-annuelles, et de définir une relation : Débit = f ( Sup., Pluvio. ) pour l'ensemble du bassin amazonien du Brésil.

Le calcul du bilan hydrique a montré que le ruissellement n'est pas homogène sur l'ensemble du bassin, mais varie de  $15 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$  ( Rio Tocantins) à  $48 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$  (Rio Solimões). Les coefficients d'écoulement les plus forts sont observés sur les bassins des rios Negro et Solimões (>50%), alors que pour les tributaires méridionaux de l'Amazone (Purús, Madeira, Tapajós, Xingu & Tocantins), ce coefficient varie de 30 à 40%. Calculé sur une longue période (1973-1990), le débit moyen de l'Amazone à l'embouchure est estimé à  $209\,000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ .

Entre son entrée au Brésil et son embouchure, le débit de l'Amazone est multiplié par 4.5 et les apports se répartissent à peu près à égalité entre les affluents de rive gauche et de rive droite (respectivement 46% et 54%). Le régime saisonnier de l'Amazone évolue d'amont en aval en fonction de ces apports. Les affluents de rive gauche proviennent d'une région en moyenne plus pluvieuse avec un maximum hydrométrique centré de mai à juillet, alors que ceux de rive droite présentent ce maximum de mars à mai.

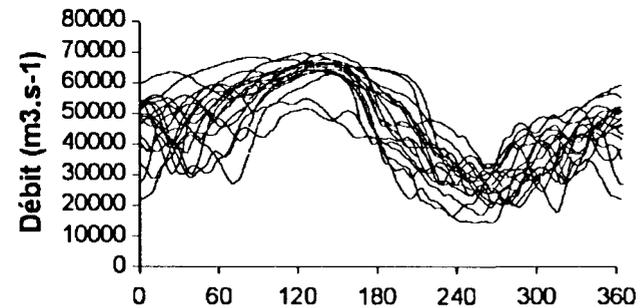
**Affluent de rive droite**

**Rio Madeira - Porto Velho (70-88)**



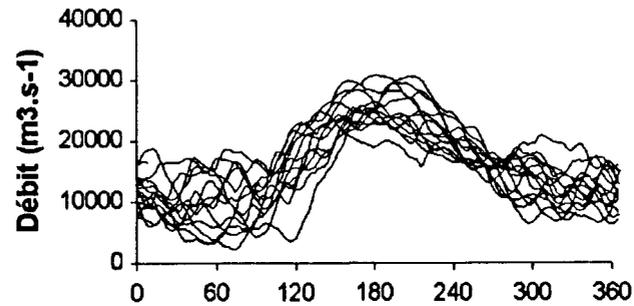
**Cours principal près de la frontière péruvienne**

**Rio Solimoes - S.P. Olivença (73-91)**



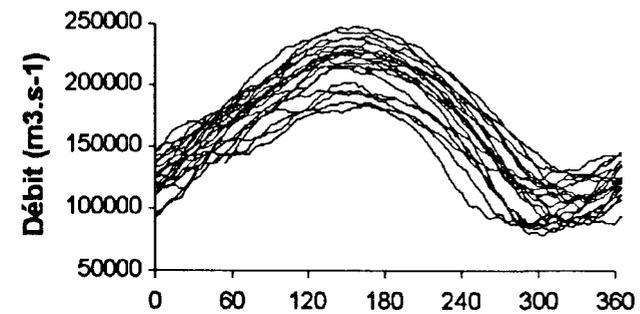
**Affluent de rive gauche**

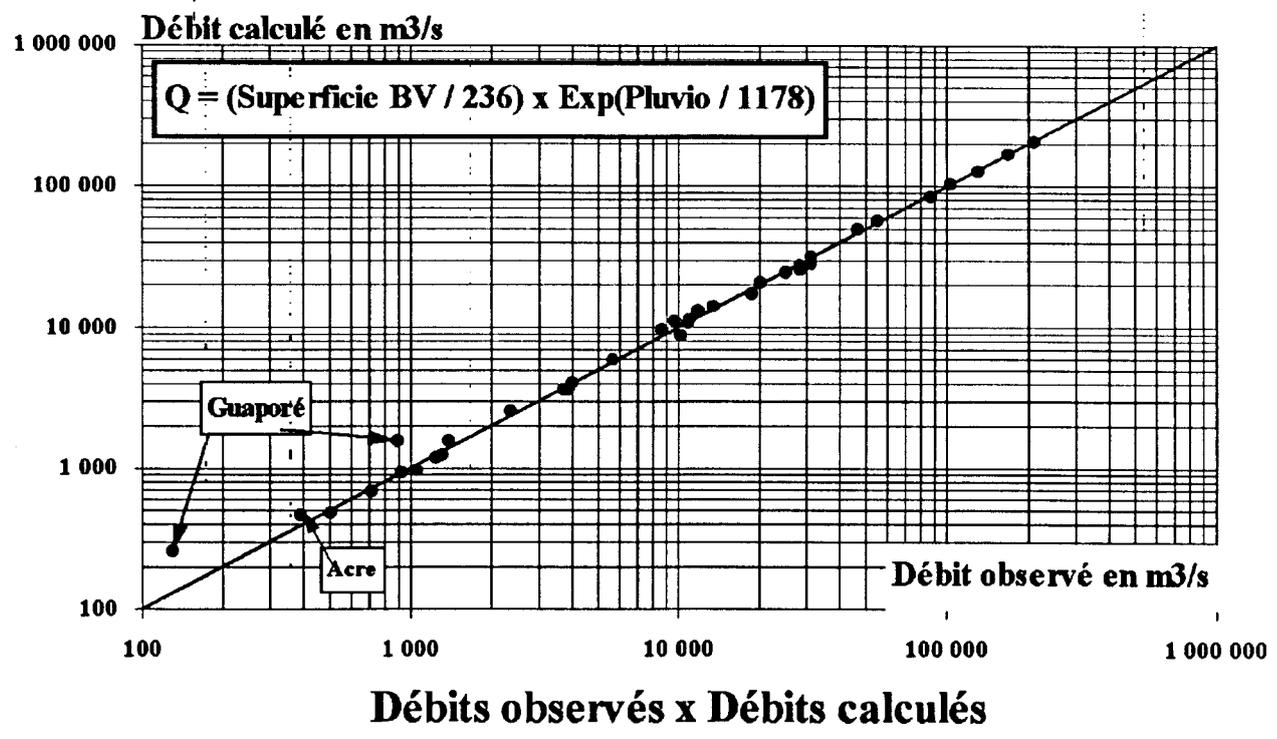
**Rio Negro - Serrinha (77-91)**



**Cours principal à l'aval**

**Rio Amazonas - Obidos (68-90)**





18

## TRANSPORT ET DEPOT DE L'OR DANS L'AMAZONE EN CRUE

I. Verhaeghe, J. Boulègue  
Lab. Géochimie et Métallogénie  
CNRS UPMC. Boîte Courrier 124.  
4, place Jussieu. 75252 Paris Cédex 05.

L'or a été analysé en phase dissoute et en suspension lors d'une crue de l'Amazonie (juin 1989). Les principaux affluents brésiliens de l'Amazonie ont aussi été étudiés. Les concentrations en or dissous sont variables : 15 à 183 pM/l; celles de l'or en suspension le sont aussi : 0,7 à 8,9 pM/l.

Les rivières "noires" (Rio Negro, ...) riches en matière humique ne transportent que de faibles quantités d'or dissous par comparaison avec les rivières "blanches" issues des Andes. Cependant dans les deux cas le transport de l'or doit être assuré majoritairement sous forme de complexes organiques.

Les zones inondables (Varzea) apparaissent être des zones où se produisent des transferts secondaires et des dépôts rapides de l'or amené des Andes par les crues.

Les flux d'or obtenus lors de la campagne de juin 1989 sont présentés en figure 1.

Nous avons estimé que les apports d'or du bassin amazonien vers l'Océan Atlantique sont de l'ordre de 50 ( $\pm$  10) tonnes/an.

Cet apport serait équivalent à celui de l'ensemble des autres rivières mondiales. Ces données permettent de calculer un nouveau temps de résidence de l'or dans l'océan mondial : 140 ans.

## Références

Rémi B., Verhaeghe I., Mauchien P. (1991) Real sample analysis by ETA-LEAFS with background correction : application to gold determination in river water. *Applied Spectrosc.*, 44, 19-24.

Verhaeghe I. (1991) Comportement de l'or et de l'iridium dans les environnements de surface. Thèse doctorat Université Paris 7. 148 pp.

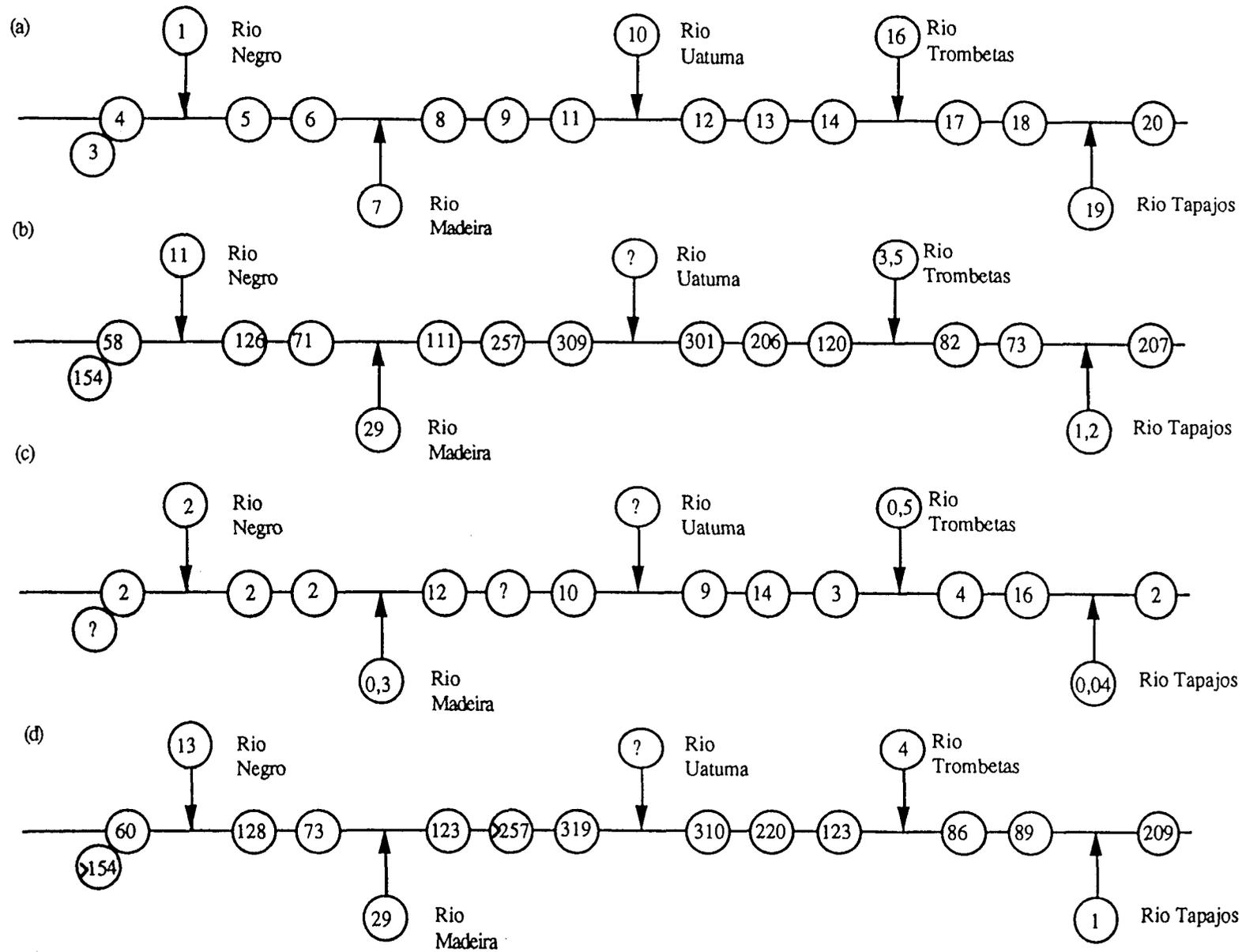


Figure n°1 : Flux d'or le long de l'Amazonie entre Manaus et Santarem exprimés en  $10^{-4}$  molls  
 (a) numéros des échantillons, (b) flux d'or dissous, (c) flux d'or particulaire, (d) flux d'or total

BIOGEOCHIMIE DE LA MATIERE ORGANIQUE DES SUSPENSIONS  
DU SYSTEME AMAZONIEN

DAGAUT J., FILLAUX J., PEPE C., SCRIBE P. et SALIOT A.

Laboratoire de Physique et Chimie Marines de l'Université Pierre et Marie Curie, UA CNRS 353, 4 Place Jussieu, 75252 PARIS Cedex 05

Résumé : Dans le cadre du programme DBT, une mission effectuée en Juin 1989, en période de forte crue, a permis la collecte de suspensions en neuf sites représentatifs de systèmes très contrastés : 1) eaux noires drainant les sédiments sableux du bassin central de l'Amazone, riches en substances humiques, acides (pH 4,4-4,8), peu turbides (les concentrations en matières en suspension (MES) sont inférieures à  $2 \text{ mg l}^{-1}$ ) et riches en carbone organique (C.O. > 25 %) (Station 1, Rio Negro, Station 2 lac de crue) ; 2) eaux blanches originaires des Andes, riches en sels nutritifs par suite de l'érosion des régions de piémont, très turbides (MES 24-27  $\text{mg l}^{-1}$ ), à faible teneur en carbone organique (Station 3 Solimoes en amont de Manaus ; Station 6 Amazone en aval de Manaus ; station 7 Madeira) ; 3) eaux stagnantes appartenant à un lac de crue (station 10) et à des marais permanents (station 15) présentant des concentrations intermédiaires en MES et des teneurs intermédiaires en carbone organique ; 4) deux affluents : le Trombetas (station 16) et le Tapajos (station 19), présentant également des concentrations intermédiaires en MES et en carbone organique.

Les particules sont obtenues par filtration de petits et de grands volumes d'eau (10-25 l) sur des filtres en fibre de verre Whatman GF/F de  $0,7 \mu\text{m}$  de porosité. Les suspensions sont congelées immédiatement jusqu'à leur analyse en laboratoire. Les petits filtres permettent la détermination de la teneur en suspensions, du contenu en carbone organique (C.O. %) et des pigments analysés par chromatographie liquide haute performance. Les grands filtres sont analysés pour leur contenu en stérols et en acides gras. Ces composés sont identifiés et quantifiés par chromatographie en phase gazeuse et couplage chromatographie en phase gazeuse/spectrométrie de masse.

L'analyse des pigments révèle une matière organique issue essentiellement des bassins versants ; la chlorophylle a prédomine ; on peut noter la faible importance des produits de dégradation de la chlorophylle a ; la contribution autochtone par les algues reste très faible, montrée par les faibles concentrations en fucoxanthine (diatomées) et en péridinine (dinoflagellés).

Les concentrations en chlorophylle a varient dans une large gamme ; elles sont très faibles dans les eaux noires du Rio Negro (traces) avec cependant un net enrichissement dans le lac de crue adjacent ( $250 \text{ ng l}^{-1}$ ), intermédiaires ( $160-560 \text{ ng l}^{-1}$ ) pour les autres stations. Le lac Amazone (Station 10) se singularise par une forte teneur en chl a (plus de  $2300 \text{ ng l}^{-1}$ ) accompagnée d'une forte proportion du carbone organique en carbone algaire, 9,2 %,

montrant que la production autochtone peut croître de façon importante dans les marais inondés si les eaux restent peu turbides à la différence des marais permanents où celle-ci reste intermédiaire ( $\text{chl } a = 460 \text{ ng l}^{-1}$ ) par suite d'une forte turbidité réduisant l'éclairement.

Douze stérols et stanols ont été identifiés dans tous les échantillons ; les concentrations les plus fortes sont rencontrées à la station 3 et dans le lac Amazone. Quatre types de distribution sont identifiés permettant une distinction nette de plusieurs systèmes de bassin versant. Le type I caractérisé par la séquence cholestérol  $\geq$  stigmastérol  $>$   $\beta$ -sitosterol  $\geq$  campestérol est rencontré aux stations 1, 3, 6 et 7. Le type II marqué par une inversion entre l'importance du cholestérol et du stigmastérol (stigmastérol  $>$  cholestérol  $>$   $\beta$ -sitostérol  $\geq$  campestérol) est typique des stations 2, 10 et 15 ; il est donc associé préférentiellement aux eaux stagnantes. Beaucoup plus intéressantes sont les empreintes de type III et IV qui marquent les suspensions du Trombetas et du Tapajos, respectivement. Les séquences observées sont les suivantes : type III, stigmastérol  $\approx$  cholestérol  $\approx$   $\beta$ -sitostérol  $>$  campestérol et type IV 22 dehydrocholestérol  $>$  cholestérol  $>$  campestanol  $>$   $\beta$ -sitostérol  $\approx$  campestérol et absence de stigmastérol.

Ces empreintes confirment l'information pigmentaire : large prédominance de la matière organique végétale terrestre, à l'exception de la station 19 dans le Tapajos où la contribution autochtone est bien visible avec l'importance du 22-dehydrocholestérol.

Les valeurs des rapports stanols/stérols pour les couples  $\beta$ -sitostanol/ $\beta$ -sitostérol et stigmastanol/stigmastérol les plus fortes sont observées pour les eaux blanches, suggérant une dégradation microbiologique avancée de la matière organique.

L'analyse des acides gras insaturés et saturés permet d'évaluer dans le détail l'état de dégradation de la matière organique globalement trouvé peu avancé au vu de la faible teneur des produits de dégradation de la chlorophylle. Les valeurs des rapports insaturés/saturés légèrement supérieures à 1, suggèrent une matière fraîche, en particulier aux stations 3, 16 et 19.

Ce même type d'approche a été appliqué à d'autres grands bassins fluviaux tropicaux et arctiques et doit permettre de caractériser la matière organique et de comparer les processus associés dans les transferts de matière du bassin versant au fleuve dans des conditions extrêmes.

# IMPORTANCE DE LA FRACTION COLLOÏDALE DE LA MOD DANS LE TRANSPORT DES METAUX EN REGION AMAZONIENNE

Jean-Yves BENAÏM, Frédérique EYROLLE et Dominique FEVRIER

*Laboratoire de Recherche en Chimie Marine des Organométalliques,  
Université de Toulon et du Var, 83957 La Garde - FRANCE.*

## INTRODUCTION

Les métaux issus de roches cristallines par érosion ou altération sont drainés et évacués des sols, piégés par la matière organique. Les eaux de percolation peuvent véhiculer une charge organique importante notamment dans les régions où le climat chaud et humide favorise et accélère les processus d'humification et d'altération des sols (1). Il semble que la matière organique colloïdale c'est à dire la matière organique de haut poids moléculaire puisse jouer un rôle non négligeable. En effet, de par sa taille, cette matière développe au sein d'une eau naturelle d'importantes charges de surface généralement négatives (dans les conditions de pH et de force ionique des eaux douces naturelles). Cette matière constitue par conséquent un très bon support de fixation et d'immobilisation des métaux. Les interactions alors mises en jeu ne sont pas uniquement régies par les lois habituelles de la thermodynamique des solutions. Des forces électrostatiques (Coulomb, Van Der Waals) interviennent (2). A la surface d'un colloïde ces interactions doivent également être prises en compte.

Comme nous l'avons montré lors de l'étude d'eaux provenant d'un bassin versant du Paraná (3) l'utilisation de techniques analytiques adaptées peut permettre de mieux caractériser ces associations. La voltamétrie par redissolution anodique (D.P.A.S.V.) couplée à l'ultrafiltration a également été utilisée pour l'étude d'eaux douces naturelles alimentant une partie du bassin Amazonien ainsi que l'électrode sélective aux ions  $\text{Cu}^{2+}$  et l'électrode de pH afin de déterminer les densités de sites et d'étudier l'aptitude à fixer les métaux des diverses fractions isolées selon un critère de taille (PM). La taille des molécules isolées par ultrafiltration a par ailleurs pu être soulignée par une analyse de la dimension (nm) des molécules concentrées dans les diverses fraction au moyen de la spectroscopie de corrélation de photons (PCS).

## METHODES ET ANALYSES

Les résultats présentés ici ont été réalisés dans le cadre du programme PEGI. Les prélèvements ont été effectués dans l'Amapá près de Serra do Navio ainsi qu'au nord de Manaus, en fin de saison sèche. Les échantillons sont traités selon le protocole déjà utilisé lors de la campagne DBT dans le bassin du Paraná (3). Les appareillages d'analyses utilisés ont été:

- un **système d'ultrafiltration** composé d'un support ULTRASART (Sartorius) fonctionnant avec des membranes d'ultrafiltration de seuil de coupure à 0,2  $\mu\text{m}$ , 100 000D, 20 000D et 5 000D.

-un **analyseur Dorhman DC 80** pour la détermination des teneurs en carbone organique dissous (COD).

- un **polarographe modèle BAS 100** associé à une électrode HMDE PAR modèle 303, connecté à un microordinateur pilotant une pompe pour la réalisation des ajouts de métal, utilisé en mode D.P.A.S.V. (Differential Pulse Anodic Stripping Voltametry), et permettant de suivre les concentrations de cuivre de façon totalement automatisée.

-Une **électrode sélective aux ions  $\text{Cu}^{2+}$**  modèle 94-29, une **électrode de référence double**

**jonction** modèle 90-02 et **une électrode de Ross**, toutes trois commercialisées par ORION et connectées à **un potentiomètre (Tanager auto titrator system)** à double canal, de forte impédance et piloté par un microordinateur.

-Un **spectromètre système 4700** commercialisé par Malvern Instruments associé à **un laser à argon** (Spectra-physic) d'une puissance moyenne de 3W.

Après vérification des bilans matière en carbone organique dissous la taille des molécules isolées par ultrafiltration en cascade a été déterminée pour certaines fractions suffisamment concentrées en COD (50 mg/l). Pour tous les points de prélèvement, chaque fraction, contenant de la matière organique isolée selon le protocole de fractionnement explicité (3), est étudiée quant à son aptitude à masquer le métal (mesure de la quantité de sites actifs) d'une part au moyen de la technique ampérométrique et d'autre part au moyen des techniques potentiométriques. Le cuivre formant des complexes stables avec la plupart des ligands organiques est le plus souvent utilisé comme outil analytique pour évaluer la quantité de sites disponibles pour la complexation des métaux. Si CC est la capacité complexante usuelle (4), la concentration totale en ligands est CL ( $CL = Cc + Cu_i$ ). Le rapport CL/COD est alors défini comme la densité de sites complexants disponibles et est exprimé en  $\mu\text{mol Cu/g}$  de COD (5).

## RESULTATS ET DISCUSSION

Les fractions étudiées par PCS ont permis de montrer l'efficacité du fractionnement par ultrafiltration à savoir une diminution de la taille (nm) des molécules lorsque le seuil de coupure (PM) de la membrane décroît. Toutefois les diamètres déterminés sont apparus relativement importants pour les plus petites fractions isolées au regard de la littérature et des données des fabricants de membranes (fraction <5000 D: taille moyenne de 51,8 nm par exemple).

Neuf points de prélèvement issus de divers systèmes pédologiques de la région Amazonienne (latosols, latosols-podzols, podzols, groupe Vila Nova) ont été choisis (fig.1). Après réalisation des mesures décrites précédemment les distributions obtenues au moyen de la DPASV sont rapportées sur les figures 2,3,4. Pour un point de prélèvement (ZEFI II) Le tableau 1 donne un exemple de calcul: les valeurs du Cuivre initial, du COD et de CL permettent de calculer la densité de sites .

Les résultats donnés peuvent être comparés à ceux du Paraná, publiés récemment (3). Dans la majorité des cas une augmentation du nombre de sites, pour une même quantité de COD est notable lorsque le poids moléculaire augmente de 5 000 D à 100 000D; puis, pour des molécules encore plus grosses, au delà de 100 000 D, le nombre de sites diminue alors. Ce type de distribution présentant un maximum plus ou moins marqué a été observé sur la plupart des points de prélèvement étudiés et peut se justifier si l'on prend en compte deux phénomènes prépondérants: le premier correspondant à une augmentation des possibilités d'adsorption physique par attraction électrostatique quand la taille des molécules augmente (macromolécules miscellaires chargées), le second à l'inverse impliquerait une diminution des capacités de complexation par masquage et inactivation des sites emprisonnés au sein d'une macromolécule. Si nous comparons les résultats ci dessus avec ceux obtenus lors de la précédente étude, nous notons de plus faibles capacités complexantes (100 et 1000  $\mu\text{mol Cu / g}$  de COD au lieu de 600 à 2000  $\mu\text{mol Cu / g}$  de COD). Avant de formuler toute autre hypothèse sur l'aptitude à la complexation de ces eaux, il faut remarquer que le pH varie dans des limites suffisantes pour rendre compte des phénomènes observés. Les mesures sur les eaux Amazoniennes, en général très acides, ont été effectuées à pH 6 alors que les eaux du Paraná ont été analysées à pH 7.

Les mesures de densité de sites sur les eaux filtrées sous 0,45  $\mu\text{m}$  ont permis de montrer une aptitude relativement importante des eaux de drainage des latosols comparativement aux eaux de drainage des podzols. De plus la détermination de la distribution des pKa sur ces divers échantillons d'origine pédologique particulière a souligné la présence de matière organique relativement moins évoluée et de PM élevé à l'issue des podzols par rapport aux latosols. Enfin les eaux très colorées (eaux noires) fréquemment rencontrées en amont des bassins versants alimentant le Rio Negro sont particulièrement complexantes (1,5 fois plus que les AF extraits des eaux de la réserve du DUKE par exemple). Ce résultat est particulièrement important car il souligne que des eaux riches en matière organique colloïdale peuvent présenter des aptitudes à la complexation supérieures à celles développées par les substances fulviques pourtant considérées comme très fonctionnelles et être considérablement aptes à fixer et à transporter les métaux.

## CONCLUSION

L'étude de bassins du réseau Amazonien a été réalisée afin de mettre en évidence la contribution du matériel organique colloïdal dans les phénomènes de transport des métaux provenant de l'altération des sols en zone équatoriale. Les résultats obtenus par une technique d'analyse électrochimique montrent que pour une concentration en COD donnée il y a, d'une manière générale, augmentation de la quantité de sites actifs vis à vis de la fixation du cuivre lorsque la taille des colloïdes s'accroît. L'observation des associations métal matière organique au niveau de cours d'eau appartenant à un système (bassin versant) que l'on peut définir et caractériser en termes de géologie, pédologie et hydrologie permet de mieux comprendre les phénomènes d'altération des sols. La matière organique dissoute doit être prise en considération dans sa globalité et non représentée par le biais de substances humiques extraites. Le fractionnement physique permettant de préciser le rôle plus ou moins important des fractions colloïdales. Toutefois, les techniques électrochimiques employées n'ont pas permis d'évaluer la contribution des colloïdes minéraux dans les phénomènes de transport des métaux.

## BIBLIOGRAPHIE

- 1- COLIN F., BRIMHALL G., NAHON D., LEWIS C.J., BARONNET A. et DANTI K., Equatorial rainforest lateritic soils: a geomembrane filter, *Geology*, **20**, 523-526 (1992)
- 2- TIPPING E., WOOF C. et HURLEY M. A., Humic substances in acid surface waters; modelling aluminium binding, contribution to ionic charge-balances and control of pH, *Water Research*, **25**, 4, 425-435 (1991)
- 3- EYROLLE F., FEVRIER D., BENAÏM J.Y., Etude par DPASV de l'aptitude de la matière organique colloïdale à fixer et à transporter les métaux: exemple de bassins versants en zone tropicale, *Environmental Technology*, **14**, 701-717 (1993)
- 4- HART B.T., Trace metal complexing capacity of natural waters: a review, *Environ. Techno. Letters*, **2**, 95-110 (1981)
- 5- BENAÏM J.Y., La matière organique dissoute et complexante dans les eaux de mer: méthodes, mesures, aspects ecotoxicologiques, *Océanis*, **16**, Fasc. 4, 313-328 (1990)

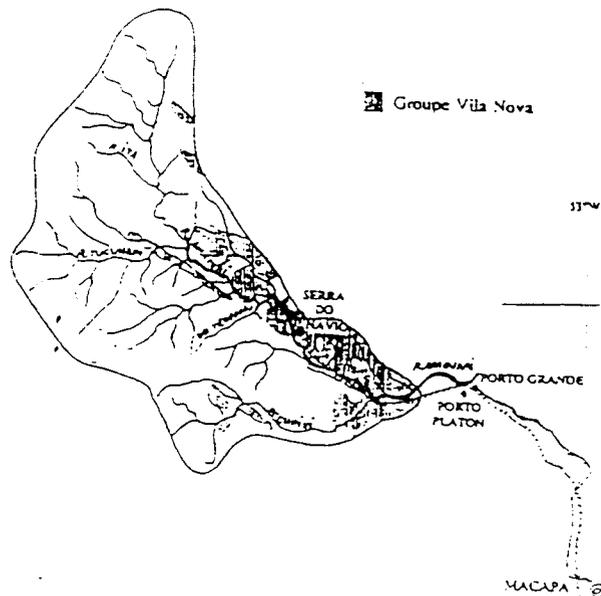
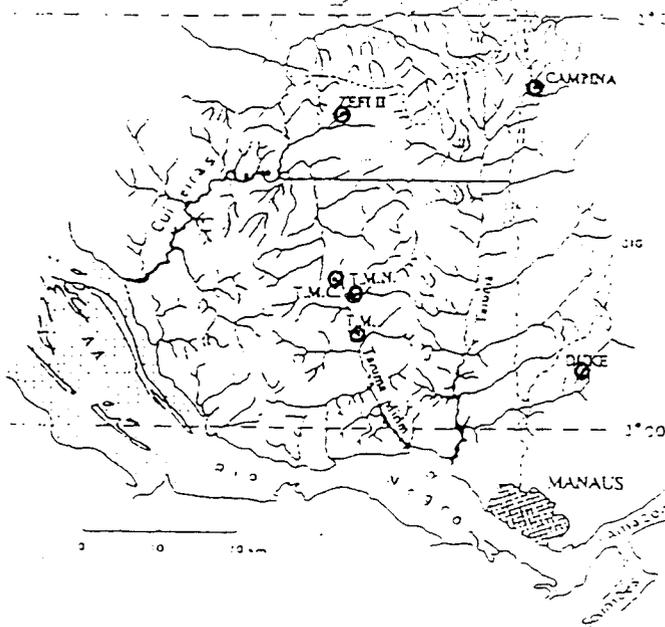


Fig. 1 Location of the sampling points.

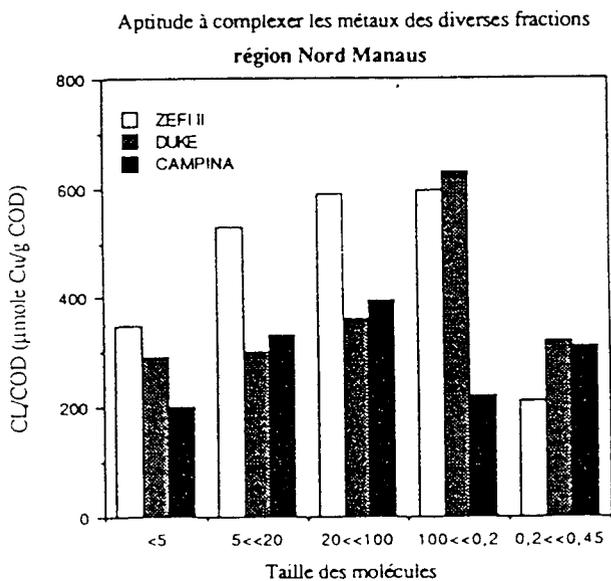


Fig. 2

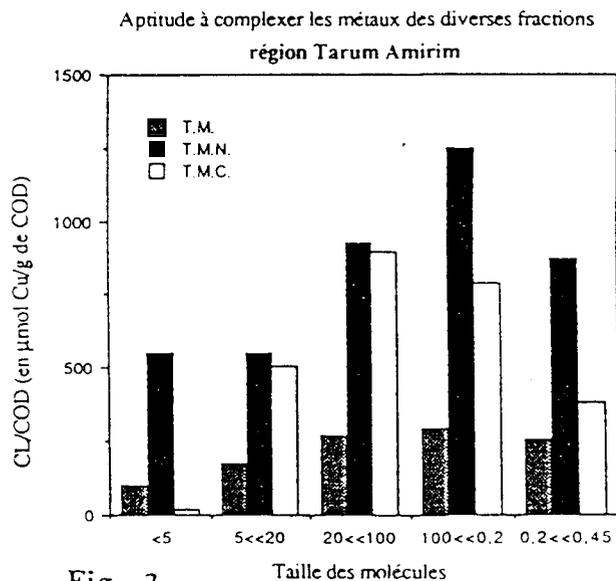


Fig. 3

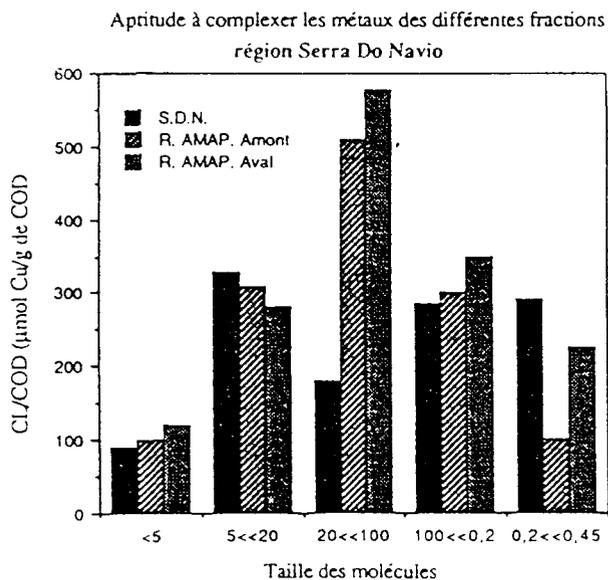


Fig. 4

Exemple de calcul de densité de sites complexants pour un fractionnement d'eau

Fractions	COD*	Cu <sub>i</sub>	CC	CL	CL/COD
<5K	0,36	0,0314	0,0942	0,126	349
5K<<20K	1,10	0,157	0,424	0,581	528
20K<<100K	1,11	0,057	0,389	0,646	582
100K<<0,2 µm	1,20	0,084	0,628	0,712	593
0,2 µm<<0,45 µm	1,06	0,065	0,157	0,222	209

Tableau 1: Détermination des rapports CL / COD (en µmol.g<sup>-1</sup>) à partir de la mesure du Cuivre initial (Cu<sub>i</sub> en µmol.l<sup>-1</sup>), du COD (en mg/l), des capacités complexantes (CC en µmol.l<sup>-1</sup>) pour le point de prélèvement ZEFI II ( CL/COD = (Cu<sub>i</sub> + CC)/COD). \* Lorsque nécessaire (fractions supérieures à 5000 D) des dilutions ont été effectuées afin d'obtenir des concentrations en COD voisines du mg.l<sup>-1</sup>.

## Biogéochimie de la matière organique des suspensions du système amazonien

Transfert de la matière organique de la végétation et des sols aux suspensions fluviales du  
Duke (Manaus).

BRIAND G.<sup>(1)</sup> - SCRIBE P.<sup>(1)</sup> - DAGAUT J.<sup>(1)</sup> - SALIOT A.<sup>(1)</sup> - PEPE C.<sup>(2)</sup>  
CHAUVEL A.<sup>(3)</sup> - DESJARDIN T.<sup>(3)</sup>

(1)Laboratoire de Physique et Chimie Marine - Université Paris VI.

(2)Laboratoire de Spectrochimie Moléculaire - Université Paris VI.

(3)INPA-ORSTOM - Manaus.

L'étude de la biogéochimie de la matière organique a été entreprise dans le programme PEGI sur les thèmes "Interactions Milieu Vivant-Milieu Minéral" et "Grands Bassins Versants", qui définissent chacun des échelles de temps et d'espace spécifiques. La méthodologie analytique est fondamentalement la même dans les deux cas ; elle consiste d'une part, en une approche globale pour définir la composition en grandes classes biogéochimiques et le caractère plus ou moins détritique (C.H.N.,  $\delta^{13}C$ , pyrolyse Rock-Ewal et pyrolyse-GC-MS) et d'autre part, en une approche moléculaire susceptible de préciser l'origine de la matière organique, à l'aide de deux catégories de marqueurs : les stérols issus des lipides des tissus non ligneux et les dérivés phénoliques issus des lignines.

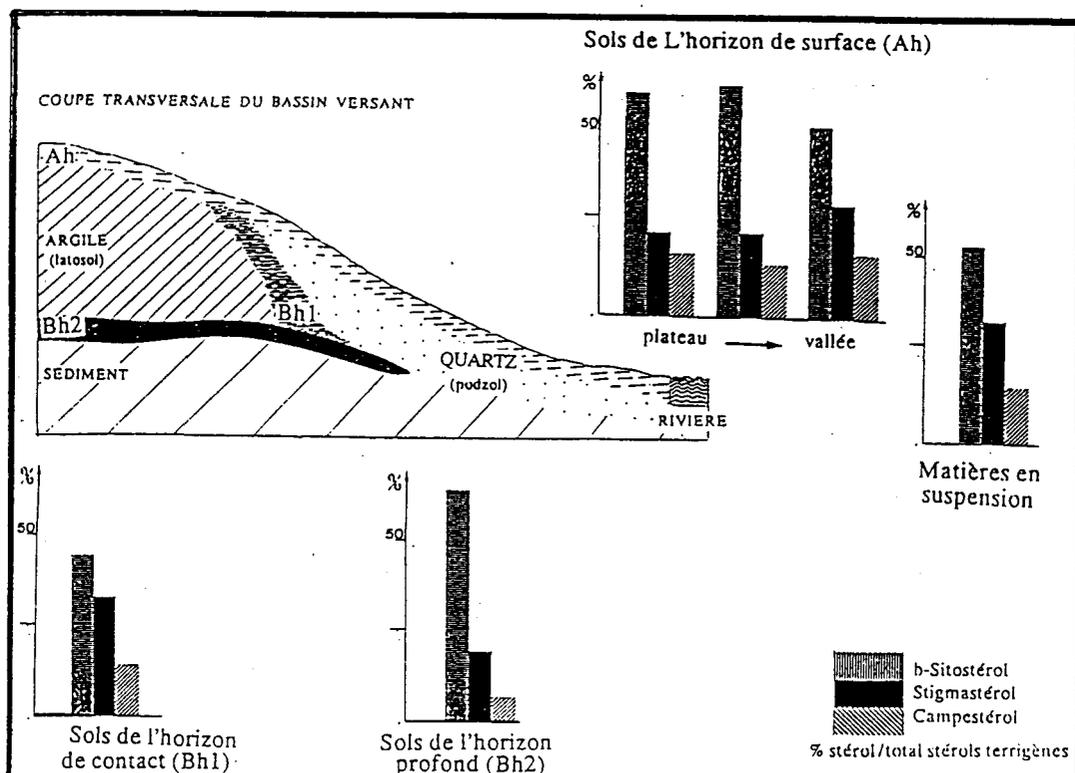
Un des premiers objectifs a été l'étude de la matière organique des litières végétales et des sols du bassin versant du Duke (Manaus), en six points du bassin, à différentes distances du cours d'eau et à différentes profondeurs (quelques cm à 180 cm). Quatre campagnes conduites de Novembre 91 à Mai 93 en coopération avec l'équipe de l'ORSTOM à Manaus, ont permis d'effectuer un échantillonnage au cours de plusieurs épisodes hydrologiques, sur des systèmes pédologiques contrastés : bassin latosol (eaux claires) ; bassin podzol (eaux noires) ; système mixte du bassin du Duke avec des latosols sur le plateau, des podzols en bas du versant et un horizon d'accumulation entre les deux (Figure 1). De nombreuses données sont en cours d'acquisition et de traitement, en particulier, les échantillons des épisodes pluvieux qui n'ont été disponibles qu'en Juillet 93.

Sur le Duke, l'analyse globale de matière organique par pyrolyse-GC-MS des sols et des suspensions montre une empreinte de fragments de polysaccharides, protéines, lignines et aminosucres. Pour les sols de surface et le matériel en suspension ( $> 0,7 \mu m$ ), les allures des pyrogrammes sont proches. On note une plus grande similitude entre les empreintes des particules et des sols de bas de versant. Les horizons Bh1 et Bh2 sont en cours d'étude.

Pour l'analyse des marqueurs moléculaires, un premier ensemble de résultats sur les stérols, correspondant à un échantillonnage de période sèche, a permis d'identifier 10 stérols principaux communs à tous les échantillons. Parmi les stérols en C28 et C29, on a sélectionné trois stérols ( $\beta$ -sitostérol, stigmastérol, et campestérol) et leurs stanols associés comme indicateurs non ambigus de la matière organique ayant pour origine les plantes cuticulaires. L'horizon de surface montre une prédominance du  $\beta$ -sitostérol avec une croissance du stigmastérol vers les sols proches du cours d'eau. L'horizon profond (Bh1) se distingue des horizons de surface (Ah) et (Bh2) par un accroissement du stigmastérol. Le matériel en suspension de la rivière présente une empreinte identique à celle des sols de surface et des sédiments superficiels, suggérant une origine due à l'érosion suivie d'une remise en suspension, pendant ces épisodes non-pluvieux.

A l'échelle des grands bassins versants, une mission effectuée en juin 89 en période de fortes crues, a permis la collecte de suspensions de neuf sites représentatifs et très contrastés du système amazonien. L'analyse des pigments montre que la contribution autochtone par les algues reste très faible (< 10%) mais peut croître de manière importante dans la plaine inondable. Pour les stérols, quatre types de distribution ont été identifiés permettant une distinction nette entre plusieurs systèmes de bassins versants. Un poster est présenté sur ces derniers résultats au cours de ce colloque.

Ces résultats encourageants suggèrent la poursuite d'une recherche, en maintenant sur le plan méthodologique une double approche analytique (globale et moléculaire) et sur le terrain l'étude à grande et petite échelle. Ce qui devrait permettre, à terme, de relier les processus impliqués dans le transfert de matière du bassin versant au fleuve.



Colloque Grands Bassins Fluviaux, PEGI, Paris, 22-24 Novembre 1993

## **Les flux de matières dissoutes et particulaires dans le bassin du Rio Madeira, Amazonie bolivienne.**

**Jean Loup GUYOT, ORSTOM Brasília**

### **Résumé :**

Le Rio Madeira est le seul grand fleuve du bassin amazonien qui draine à la fois la cordillère des Andes, le bouclier brésilien et la plaine. A Villabella, à la frontière boliviano-brésilienne, le bassin du Rio Madeira couvre 903500 km<sup>2</sup>, dont 25% dans les Andes, 27% dans le bouclier brésilien et 48% dans les Llanos (plaine amazonienne de Bolivie). Il s'agit d'un grand bassin fluvial aux caractéristiques climatiques et topographiques contrastées (de 120 m à 6500 m d'altitude et de 200 mm.an<sup>-1</sup> à plus de 6000 mm.an<sup>-1</sup> de précipitations suivant les régions), à la géologie variée (du socle Précambrien du bouclier brésilien aux séries sédimentaires quaternaires d'altitude), et à la végétation qui passe d'une couverture rase en altitude à la forêt tropicale humide.

Un protocole d'échantillonnage, basé sur des prélèvements journaliers et décennaires, a été spécialement mis au point aux 11 stations du réseau PHICAB (Programme Hydrologique et Climatologique du Bassin Amazonien de Bolivie, ORSTOM - SENAMHI - UMSA) situées au piedmont andin et en plaine amazonienne.

L'étude du régime des flux de matières particulaires montre que dans les Andes, l'essentiel du transport se produit en période de crue, et les trois mois de plus hautes eaux (de janvier à mars) peuvent représenter jusqu'à 90% du flux exporté durant

93

l'année. Dans les Llanos où le régime hydrologique est davantage régularisé par la longueur du trajet et l'influence des plaines d'inondation (150000 km<sup>2</sup>), ce pourcentage est de l'ordre de 60%.

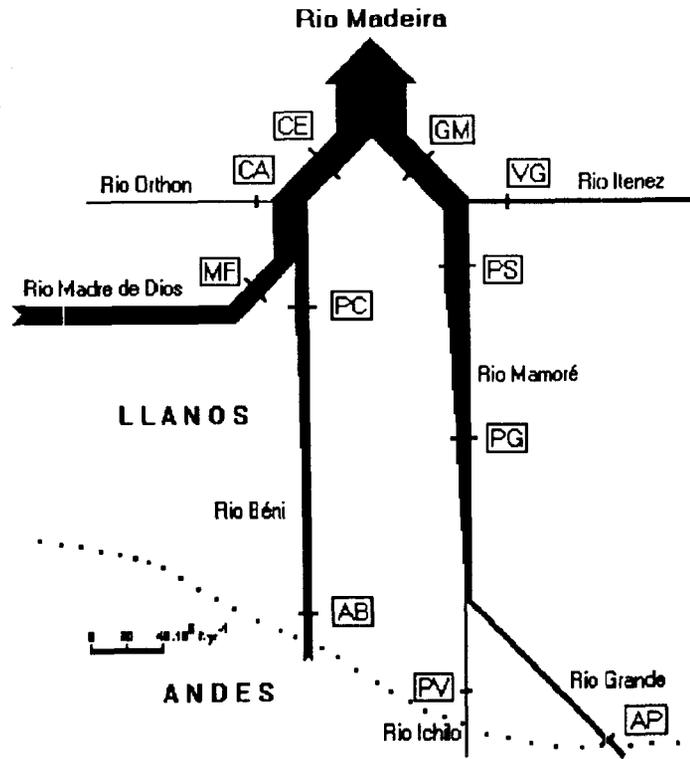
Les fleuves andins exportent un flux de matières particulaires estimé à 500 10<sup>6</sup> t.an<sup>-1</sup>, ce qui correspond à un taux d'érosion mécanique moyen théorique de 3200 t.km<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup> de la chaîne andine de Bolivie. Lors de la traversée des Llanos, plus de la moitié de ce flux sédimentaire va se déposer dans les plaines d'inondation. Pour le bouclier brésilien, ce taux de transport particulaire est estimé à 16 t.km<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>.

Du fait d'une faible variabilité des concentrations en matières dissoutes au cours du cycle hydrologique, le régime des flux de matières en solution exportés par les fleuves est quasiment identique au régime hydrologique.

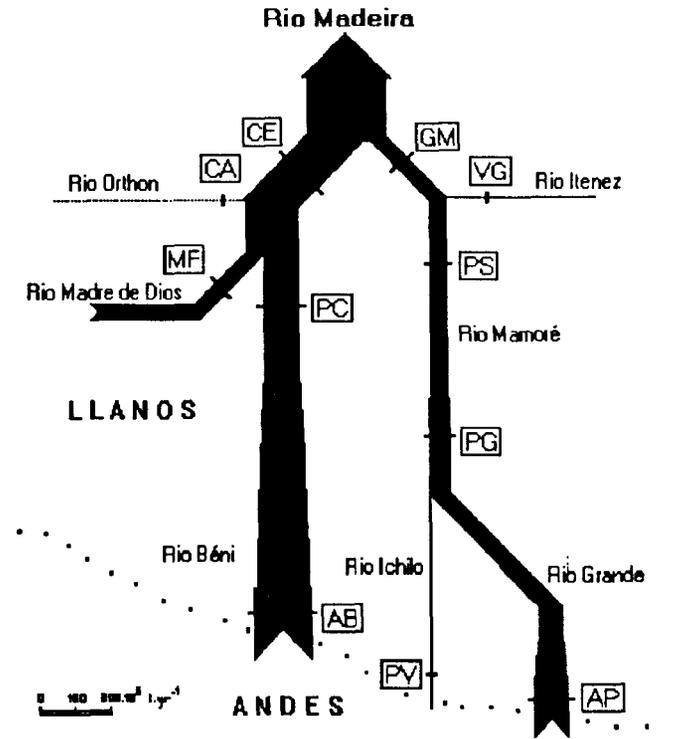
Le Rio Madeira à Villabella, dont le module est de 18000 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, reçoit un flux de matières particulaires de l'ordre de 230 10<sup>6</sup> t.an<sup>-1</sup>, et un flux de matières dissoutes de 40 10<sup>6</sup> t.an<sup>-1</sup>. Si le Rio Madeira débouchait dans l'océan, il serait en 8<sup>ème</sup> position des grands fleuves mondiaux en terme de débit et de flux de matières particulaires.

La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus sur le Congo montre que la variabilité temporelle est toujours plus forte sur le Rio Madeira, qu'il s'agisse des débits (facteur 3), des matières dissoutes (facteur 2), ou des matières en suspension (facteur 5). Alors que le Congo et le Rio Madeira reçoivent des précipitations du même ordre de grandeur, l'écoulement relatif est nettement plus important pour le Rio Madeira. Cette différence s'accroît nettement dans le cas des flux de matières transportées, du fait de l'érosion de la chaîne andine. Ainsi, 1 km<sup>2</sup> du bassin du Rio Madeira produit 2 fois plus d'eau, 4 fois plus de matières dissoutes, et 30 fois plus de matières particulaires que 1 km<sup>2</sup> du bassin du Congo.

### Bassin du Rio Madeira Flux de matières dissoutes.

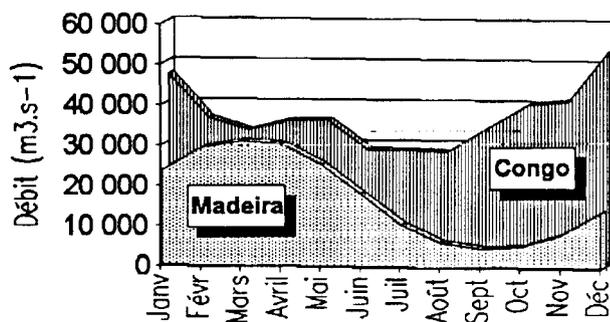
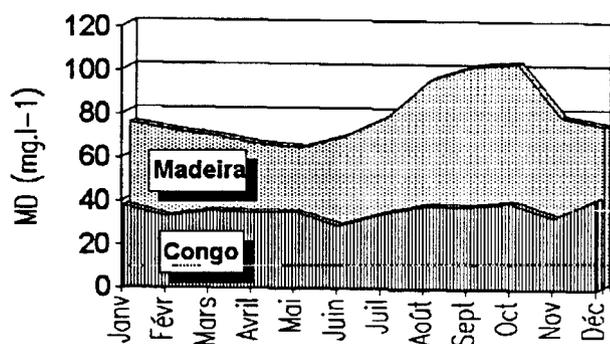
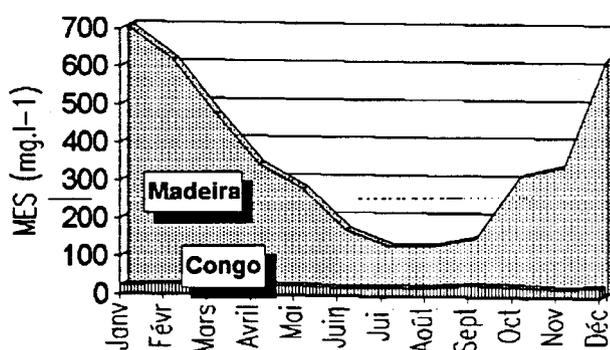


### Bassin du Rio Madeira Flux de matières particulaires.



hb

95

**A****B****C**

Débits moyens mensuels (A), teneurs moyennes mensuelles en matières dissoutes (B), et teneurs moyennes mensuelles en matières en suspension (C), du Congo à Brazzaville (1987-1992) et du Rio Madeira à Villabella (1983-1989).

Colloque "Grands Bassins Fluviaux peri atlantiques" Paris. 22-24/11/93

GÉOCHIMIE DE FLEUVES TROPICAUX ET DE RIVIÈRES ÉQUATORIALES  
DE L'EST DU PARA (BRÉSIL)

*B. Hiéronymus\**, *J.M. Godot\**, *J. Boulègue\**, *B. Kotschoubey\*\**, *P. Négrel\*\*\**, *T. Bariac\*\*\*\**

\* Laboratoire de Géochimie et Métallogénie. CNRS-UPMC  
Casier postal 124 - 4, place Jussieu - 75252 Paris Cedex 05.

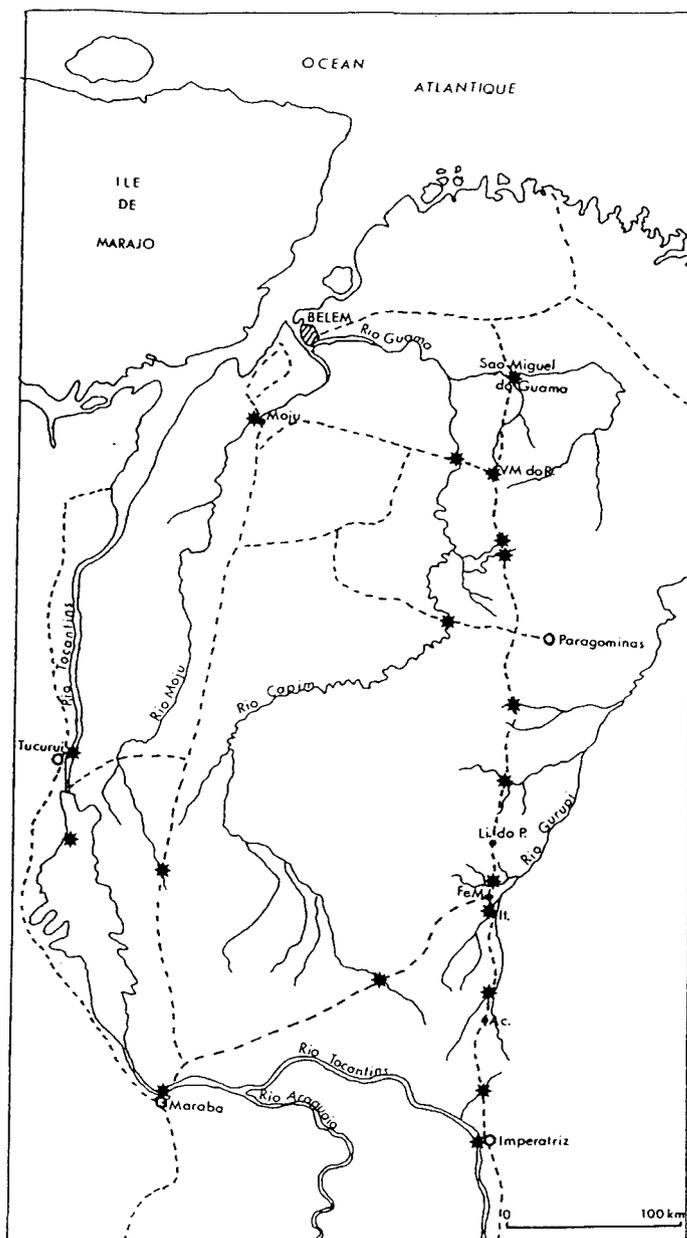
\*\* Nucleo de Ciencias Geofísicas et Geológicas da Unversidade do Para - Belem. Brésil.

\*\*\* Laboratoire de Géochimie et Cosmochimie. IPGP-CNRS  
4, place Jussieu - 75252 Paris Cedex 05.

\*\*\*\* Laboratoire de Biogéochimie isotopique. UPMC  
Casier postal 120 - 75252 Paris Cedex 05.

Nous avons échantillonné le Tocantins ainsi que des fleuves cotiers de l'Est de l'Etat du Para afin de comprendre les processus d'acquisition de leur charge dissoute.

Carte d'échantillonnage des  
eaux du Tocantins et des  
rivières de l'Est du Para.  
Les points d'échantillonnage  
sont représentés par des  
étoiles.



Ces fleuves et rivières présentent l'intérêt d'être dans une région subissant une pression anthropique encore assez limitée.

L'installation du barrage de Tucuruí et d'industries dans cette région représentent cependant depuis quelques années une source locale potentielle de pollution.

Les éléments et paramètres mesurés ont été les suivants :

pH, Alk, Na, K, Mg, Ca, Sr, H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>, Al, Cl, SO<sub>4</sub>,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ .

Seuls les éléments en phase dissoute ont été mesurés.

Les analyses ont été traitées en supposant que les éléments dissous pouvaient avoir plusieurs sources : roches, apport atmosphérique continental, apport atmosphérique marin. Il a été possible de calculer les apports atmosphériques globaux et les contributions dues à l'altération des roches.

Dans le tableau ci-dessous on présente les caractéristiques des apports atmosphériques globaux aux fleuves comparés à ceux des apports déjà connus en Amazonie (en rapports atomiques par rapport au chlorure).

X/Cl apport atmosphérique	Tocantins	Rivières	Pluies continentales Amazonie	Pluie Marine	Aérosols Amazonie
Na/Cl	1,0	0,7	0,91	0,84	
K/Cl	0,66	0,12	0,073	0,021	0,4 - 1,8
Mg/Cl	0,09	0,07	0,091	0,108	0,6
Ca/Cl	0,06	0,04	0,082	0,018	0,18 - 0,31
SO <sub>4</sub> /Cl	0,85	0,1	0,37	0,127	0,6 - 1,5
Sr/Cl	$5 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-4}$			$3,5 \times 10^{-3}$

Les contributions dues à l'altération des roches ont aussi été calculées après correction des apports atmosphériques globaux.

Elles sont présentées sous forme du rapport atomique de l'élément à l'alcalinité (Alk) dans le tableau ci-dessous.

X/Alk altération	Na Alk	K Alk	Mg Alk	Ca Alk	Sr Alk	H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> Alk	Al Alk
Tocantins	0,055	0,023	0,24	0,19	$1 \times 10^{-3}$	0,41	$4,1 \times 10^{-3}$
Rivières	0,17	0,038	0,08	0,03-0,11	$3 \times 10^{-3}$ $4,5 \times 10^{-4}$	0,23	$1,2 \times 10^{-2}$

Les rapports isotopiques  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  montrent que le Strontium issu des apports atmosphériques et de l'altération ne reflète que des sources terrestres. L'ensemble des rivières cotières du Para est caractérisé par  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,733$ ; ce qui correspond à l'altération des formations sédimentaires locales (Itapecuru et Ipixuna). Le Strontium du Tocantins résulte du mélange de deux sources. La première est attribuée aux roches du proterozoïque du bassinement du Tocantins avec :

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0,717$ ; la seconde est due aux formations sédimentaires du Para (Itapecuru et Ipixuna).

Les flux de matière résultant de l'altération des roches de l'amont du bassin du Tocantins et les transferts du Tocantins vers l'océan ont été calculés sur la base de ces premières données.

#### Références

B. Hiéronymus, B. Kotschoubey, J.M. Godot et J. Boulègue (1990).

Estudo de interação água-rochas nas formações bauxíticas da Serra do Trucara (Estado do Parà). Anais 36° Congresso Brasileiro de Geologia, Vol 2, 867-876.

J.M. Godot, B. Hiéronymus, B. Kotschoubey et J. Boulègue (1990).

Influência do substrato geológico e dos proceções da alteração na composição das águas de alguns rios et ribeirões entre Belém et Imperatriz (Estado do Parà et do Maranhão). Anais 36° Congresso Brasileiro de Geologia, Vol 2, 889-896.

## **LES EFFETS HYDROLOGIQUES DU DEBOISEMENT DE LA FORET AMAZONIENNE ET D'UTILISATIONS ALTERNATIVES DU SOL**

**Jean-Marie FRITSCH, ORSTOM, BP 5045, 34032 Montpellier Cedex**

### **OBJECTIFS ET CADRE DE L'ETUDE**

Dix bassins versants élémentaires (notés A à J) ont été étudiés en Guyane Française dans le cadre du programme ECEREX pour évaluer les effets du déboisement et de différentes utilisations du sol au niveau des écoulements et de l'érosion. Le climat est de type tropical humide, avec une saison des pluies à deux pointes qui s'étend de décembre à juillet. La pluviométrie moyenne interannuelle est de l'ordre de 3200 mm, avec des valeurs mensuelles correspondantes de 370 mm en décembre (pic de la "petite saison des pluies" et de l'ordre de 550 mm en mai (maximum de la "grande saison des pluies").

Le substratum géologique est constitué par une couverture d'altérites de schistes. Le modelé est en forme de petites collines de moins de 100 m d'altitude, avec des pentes de l'ordre de 15 à 30%, se raccordant à des fonds de vallées plats, régulièrement inondés en saison des pluies.

La couverture végétale de la région et des dix bassins versants était uniformément constituée par la forêt primaire lorsque les observations hydrologiques ont commencé.

Les différents types de sol, plus précisément les caractéristiques du drainage interne des horizons superficiels, constituent le facteur de différenciation le plus significatif pour expliquer les différences de régimes hydrologiques entre les différents bassins versants. Les trois caractères suivants ont été identifiés et retenus :

- (I) : sols à bon drainage vertical
- (II) : sols à mauvais drainage vertical avec engorgement fréquents des horizons superficiels, constitution de nappes perchées et dynamique de l'eau à dominante latérale
- (III) : zones de battement de nappe, avec affleurement de la nappe phréatique en surface au cours des épisodes pluvieux intenses.

### **HYDROLOGIE SOUS FORET**

Compte tenu de la petite taille des bassins (1 à 2 hectares), l'étude des écoulements des bassins versants s'est faite sur les écoulements de crues (Ecoulement Rapide de Crue -  $R_c$ , et Ecoulement Total de Crue -  $T_c$ ). On a mis en évidence une très forte variabilité hydrologique spatiale, contrôlée par la combinaison des 3 caractéristiques pédologiques précédemment citées : sur une même période de 2 ans, l'écoulement annuel a varié entre 4,9% et 29,6% (pour  $R_c$ ) et 7,3% et 34,4% (pour  $T_c$ ), soit dans des proportions relatives entre bassins

de l'ordre de 1 à 6 et de 1 à 5, respectivement (tableau 1). Un bassin versant de 4,5 km<sup>2</sup> a été appareillé pour étudier les conditions du changement d'échelle. L'écoulement  $R_c$  de ce bassin versant a été de 23%, en accord avec la combinaison par unité de surface des 3 différents types de dynamique de l'eau dans le sol qui avaient été identifiés et mesurés sur les bassins élémentaires. Les débits de pointe enregistrés pendant les 2 années durant lesquelles les bassins avaient conservé leur couvert forestier ont varié entre 50 et 120 l.s<sup>-1</sup>.ha<sup>-1</sup> pour les bassins où dominaient les sols à dynamique verticale et entre 60 et 190 l.s<sup>-1</sup>.ha<sup>-1</sup> pour les bassins à nappe affleurante.

#### HYDROLOGIE DES BASSINS DEFORESTES (SOL NU)

Les modifications du régime hydrologique des bassins déboisés ont été mises en évidence par la méthode des bassins appariés (*paired watershed method*), grâce aux informations collectées sur 2 bassins témoins. Sept bassins ont été déboisés mécaniquement et un défrichement complet a été effectué sur 6 d'entre eux, laissant le sol à nu pendant pratiquement une saison des pluies. Cette année là, les écoulements de crues ont augmenté très significativement (tableau 2), les gains absolus ayant été compris entre +762 mm et +244 mm selon les bassins (les mesures n'ont pas été faites la même année sur tous les bassins). En valeur relative, les gains cumulés sur l'ensemble de la grande saison des pluies, conduisent à des augmentations comprises entre +66% et +199% par rapport aux conditions naturelles, selon les bassins (tableau 3). Ces gains sont inversement proportionnels à l'importance des écoulements en milieu naturel (ce sont les bassins les moins abondants qui réalisent les gains relatifs les plus élevés).

#### HYDROLOGIE DES BASSINS DEFORESTES (AUTRES UTILISATIONS DU SOL)

Les différents scénarios de développement après exploitation forestière et/ou défrichement agricole ont été les suivants : verger de pomelos (bassin C) ; culture traditionnelle sur brûlis - seule spéculation non mécanisée (bassin I) ; recru forestier naturel après exploitation forestière seule (bassin E), et après exploitation forestière suivie d'un défrichement complet (bassin D) ; prairie pâturée (bassin A) ; plantation de pins (G), d'eucalyptus (H) ou de framirés (J).

L'évolution des écoulements de crue ( $T_c$ ) année par année fait l'objet du tableau 4. On constate que les gains d'écoulement diminuent très sensiblement au bout de 4 ans, voire même plus tôt, pour tous les bassins versants bénéficiant de la réinstallation d'un couvert arboré continu (I, E, D, G, H). On notera aussi l'effet très sensible du défrichement mécanisé (mise à nu du sol et désouchage) par rapport à une exploitation forestière mécanisée non suivie d'un défrichement, en comparant les chiffres des bassins D et E. Le pâturage (A) et le verger (C), sont des spéculations qui favorisent le maintien d'écoulements de crue élevés.

Table 1 : Rainfall and runoff in primary forest conditions.

Watershed	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Rainfall	3423	3267	3285	3257	3350	3102	3173	3165	3285	3219
Stormflow	650	696	239	480	426	1058	947	1088	364	748
% of rain	19,0	18,2	7,3	14,8	12,7	34,1	29,9	34,4	11,1	23,3
Total flow	685	615	332	511	434	1493	1370	1577	460	831
% of rain	19,4	18,8	10,2	15,7	13,0	48,1	43,2	49,8	14,0	25,8

Interannual averages. All values in mm

Table 2 : Runoff during the first rainy season following logging and land clearing

Watershed	year	observed runoff (mm)	increase after clearing (mm)
C	1979	682	304
D	1981	479	244
A	1979	1616	762
J	1983	1037	384
G	1981	1388	621
H	1981	1453	560

Table 3 : Increase of stormflow runoff after clearing (stabilized response period)

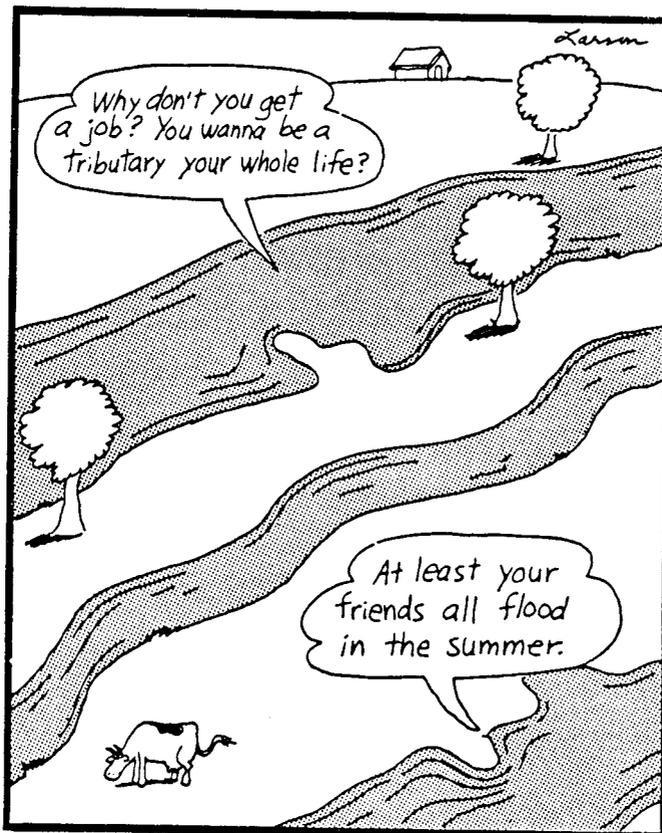
Watershed	C	D	A	J	G	H
Rainfall (mm)	1448	2207	2349	2071	1445	1620
Observed storm runoff "bare soil" (mm) (% of rainfall)	342 23,6	450 20,4	1341 57,1	954 46,1	772 53,4	787 48,6
Calculated storm runoff "forest" (mm) (% of rainfall)	114 7,9	181 8,2	627 26,7	483 23,3	414 28,7	475 29,3
Increase of runoff with bare soil (mm) (% of rainfall)	228 15,7	269 12,2	714 30,4	471 22,7	358 24,8	312 19,3
Increase of runoff after clearing (%)	289	249	214	197	187	166

Table 4 : Increases of stormflow runoff during treatments (as % of forest runoff)

	Year 1	Year 2	Year 3	Year 4	Year 5	Year 6
	Bare soil (*)					
C Grapefruit.....	199	73	17	63	46	
I Traditional slash and burn (no clearing) .....		23	30			
E Logging and regrowing (no clearing).....		4	26	2	-6	
D Logging and regrowing .....	149	40	32	16		
A Grazing of fodder grass .....	114	59	63	47	27	
J Grass plantation .....	97					
G Pine trees.....	87	62	33			-12
H Eucalyptus .....	66	47	12			-8

(\*) : stabilized response period

# BILAN HYDRIQUE ET TRANSPORTS



Parents of a lazy river

## DEUX EXEMPLES D'HYDROLOGIE REGIONALE EN AFRIQUE DE L'OUEST: LES PROGRAMMES ERREAU ET ECOULEES

Eric SERVAT

*Antenne Hydrologique ORSTOM, O6 BP 1203 CIDEX1, Abidjan, Côte d'Ivoire*

### RESUME

Les différents projets de développement élaborés et réalisés en Afrique de l'Ouest nécessitent une bonne maîtrise de la gestion des ressources en eau. C'est dans cette optique que le programme ERREAU a été lancé dans le Nord Ouest de la Côte d'Ivoire où ont été effectués des travaux de modélisation de la relation pluie-débit sur 20 bassins versants (100 à 4500 km<sup>2</sup>). L'objectif était de définir et d'évaluer des outils d'estimation des apports en eau en zone de savane soudanaise.

L'essentiel des données sur lesquelles nous avons pu travailler couvre la fin des années 1970 et les années 1980 jusqu'en 1985 ou 1986 selon les cas. Cette période est caractérisée par une forte variabilité des précipitations annuelles. L'année 1983 est caractérisée par une sécheresse très fortement marquée sur l'ensemble du territoire ivoirien (la période de retour de cet événement a été évaluée à environ cinquante ans).

Deux modèles globaux conceptuels et déterministes ont été utilisés pour mener à bien cette étude: CREC et GR3. Après calage, les valeurs des paramètres des modèles de relation pluie-débit au pas de temps journalier, utilisés dans ERREAU, ont été caractérisées afin de pouvoir utiliser ces algorithmes en simulation sur des bassins versants non jaugés ou mal connus. Dans un premier temps, les jeux de paramètres obtenus après calage année par année pour un bassin donné ont, ensuite, été systématiquement validés sur les autres années disponibles pour le bassin considéré. Nous en retiendrons que le nombre de situations où la validation conduit à de bons résultats est extrêmement faible, à savoir de l'ordre de 10 %. Il semble donc que les paramètres calés pour une station année particulière soient spécifiques et caractéristiques de celle-ci. Cette constatation amène à penser que le calage des modèles conceptuels utilisés ici est loin de n'être fonction que des seules caractéristiques physiques et géomorphologiques intrinsèques des bassins versants. Les caractéristiques climatiques et physiographiques des années et des bassins considérés ont assurément un rôle important, et doivent être nécessairement prises en considération dans toute tentative d'explication des valeurs prises par les paramètres des algorithmes pluie-débit.

Cette caractérisation s'est poursuivie par une recherche systématique des corrélations entre paramètres des modèles et différents descripteurs des bassins versants, tant physiques que climatiques ou physiographiques:

- (a) Variables caractéristiques du bassin versant: Superficie (km<sup>2</sup>), Indice de Compacité de Gravelius.
- (b) Variables caractéristiques de l'année considérée:
  - (i) Pluie Annuelle en mm (PA)
  - (ii) Pluies cumulées, en mm, du 1er Janvier aux dates suivantes: 15 Juin (Pc6), 15 Juillet (Pc7), 15 Août (Pc8), 15 Septembre (Pc9), 15 Octobre (Pc10).

- (iii) Pluies relatives (en %), définies par le rapport "Pluie cumulée du 1er Janvier à la date D/Pluie Annuelle", aux dates suivantes: 15 Juin (Pr6), 15 Juillet (Pr7), 15 Août (Pr8), 15 Septembre (Pr9), 15 Octobre (Pr10).
- (c) Variables caractéristiques de l'occupation des sols: pourcentages respectifs de savane, de forêt claire, de cultures et d'habitat.

L'utilisation des techniques d'analyse des données (Analyse en Composantes Principales, Analyse Factorielle des Correspondances, Régression multiple progressive ascendante) a permis d'établir des équations de prédétermination des paramètres des modèles, en vue de leur utilisation sur des bassins versants non jaugés. Ces équations sont d'une qualité tout à fait acceptable en ce qui concerne le modèle GR3. Cependant, dans une optique opérationnelle, il faudrait encore accroître leur fiabilité. Par la suite, le programme a été étendu au reste de la Côte d'Ivoire dans le cadre d'une approche journalière et mensuelle.

Forts de l'expérience et des résultats acquis lors du programme ERREAU, il nous a semblé nécessaire de nous intéresser à l'ensemble de la zone de savane de l'Ouest africain, mais toujours avec un souci d'utilisation possible des résultats dans le domaine de la gestion des ressources en eau. Ce qui a prévalu lors de la mise en place du programme ECOULEES (Estimation et Caractérisation dans l'Ouest africain des Lames d'Eau Ecoulees), qui s'inscrit, par ailleurs, dans la thématique de FRIEND-AOC. Ce projet, actuellement dans sa phase initiale, a pour objectif la détermination des lames d'eau écoulées annuelles et mensuelles dans l'ensemble de la zone de savane ouest africaine. Il couvre donc plusieurs pays et nécessite une approche différente comprenant la réalisation d'une véritable base de données ou encore le recours à des outils intégrateurs type S.I.G.

L'ensemble des résultats (paramètres de lois de distribution, paramètres de modèles, etc.) sera cartographié à l'échelle régionale et informatisé, constituant ainsi le volet hydrologique d'un Système d'Information Géographique (S.I.G.) concernant cette zone de savane soudanaise et guinéenne. Ces résultats informatisés et facilement accessibles seront d'une grande importance pour l'ensemble des services techniques (Directions de l'Eau ou de l'Hydraulique, Directions des Aménagements agricoles, Directions de l'Energie, etc.), et pour les différents projeteurs et aménageurs, privés ou non, devant intervenir dans cette zone dans le cadre d'opérations de développement.

## Tectonique, érosion et hydraulique des grands bassins fluviaux.

Marc SOURIAU, UPR 234/CNRS,OMP, 14 Avenue E.Belin, 31400 Toulouse.

### Introduction

Partant d'un échantillonnage de 45 grands bassins fluviaux, de l'Amazone au Rhône par ordre décroissant de surface, on définit pour chaque bassin  $i$  sa hauteur moyenne  $h_{mi}$  et son débit solide spécifique  $D_{si}$  à son embouchure au niveau de la mer. On observe 2 relations linéaires réunissant 2 populations égales de telles que:

$$D_{sj} = h_{mj} / \tau_1, \text{ avec } \tau_1 = 2.5 \text{ Ma}; \quad D_{sk} = h_{mk} / \tau_2, \text{ avec } \tau_2 = 15 \text{ Ma}.$$

On calcule ensuite les courbes hypsométriques de chaque bassin, à savoir  $h = f(a)$ ,  $a$ : surface cumulée. Pour comparer les bassins, on normalise les variables par  $H = h/h_m$  et  $A = a/a_T$ ,  $a_T$ : surface totale. En posant  $x_T = a_T^{1/2}$  et en assimilant le bassin à un carré, on définit un profil normalisé  $X = x/x_T = a/a_T = A$ . Les profils de chaque population convergent en coordonnées normalisées vers un profil unique, à savoir:

$$H = -\ln X \quad (1) \quad \text{et} \quad H - 0.3 = -\ln X \quad (2),$$

sauf dans l'intervalle  $0 \leq X \leq 0.15$  où le profil décroît linéairement. Pour la population (2),  $H - 0.3$  s'explique par une élévation du niveau de base par rapport au niveau de la mer de  $0.3 h_m$  pour chaque bassin.

### 1. Analyse du profil en boîte noire.

On suppose a priori que l'érosion fluviale dérive d'un processus de diffusion:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial h}{\partial x} \right).$$

L'existence de ces grands bassins est liée à une entrée tectonique bien différenciée, actuelle ou passée, dont on ne connaît pas a priori l'extension. Heureusement une analyse discriminatoire montre que ce type de profil s'explique au mieux par le schéma suivant:

- (i) pour  $0 \leq X \leq 0.15$ , il existe un équilibre dynamique entre soulèvement tectonique et érosion, avec un taux de soulèvement moyen de 2 mm/an pour la population (1);
- (ii) pour  $0.15 \leq X \leq 1$ , le profil logarithmique assure le transfert des sédiments de la zone de production ou zone active à l'océan; c'est la zone de transfert ou zone passive;
- (iii) la diffusivité  $k$  n'est pas comme à l'accoutumée une constante; elle est définie par:

$$k(x) = \frac{x_T}{\tau} x \quad \left( = \frac{a}{\tau} \right).$$

Par suite de la faible extension en  $x$  de la zone active, la relation de flux  $D_s = h_m/\tau$  est approximativement vérifiée. Bien sûr, il s'agit d'un schéma moyen qui ne peut en aucun cas reproduire fidèlement un bassin particulier. On espère seulement cerner un comportement fondamental servant de cadre à une interprétation moins rustique.

## 2. Modélisation physique et variables hydrauliques.

On part d'un schéma hydraulique unidimensionnel en modélisant la rivière principale dans la zone de transfert. On utilise la géométrie hydraulique standard des chenaux de rivière, à savoir la largeur  $w$ , la profondeur  $d$ , la vitesse longitudinale moyenne  $u$  et le débit liquide  $Q_w = u.w.d$ . Ces paramètres doivent s'appliquer aux conditions de crues qui assurent l'essentiel du transport sédimentaire.

Comparée à l'accroissement de la section résultant de la convergence du réseau de drainage, la vitesse  $u$  est raisonnablement constante. Sachant en outre que  $Q \propto a$ ,  $a$  : surface drainée, et que  $w \propto Q_w^{1/2}$ , alors l'accroissement de la section en aval est statistiquement homothétique; on a donc:

$$w = \beta x, d = \alpha x, \alpha \text{ et } \beta \text{ constantes.}$$

On a remplacé la distance  $x'$  le long du cours d'eau par la distance en ligne droite à la source  $x = a^{1/2}$  parce que pour les grands fleuves on a observé que  $x' = \gamma x$ ,  $\gamma \approx 2$ . La vitesse constante  $u$  doit découler d'un régime hydrodynamique stationnaire compatible avec le profil logarithmique de la zone de transfert défini par l'approche en boîte noire.

La vitesse d'écoulement turbulent dans un tuyau rugueux à surface libre est gouvernée par l'équation de Manning; soit en identifiant le rayon hydraulique  $r$  à la profondeur  $d$ , approximation valable lorsque  $w \gg d$ :

$$u = \frac{d^{2/3} s^{1/2}}{n},$$

$n$  : rugosité,  $s$  : pente =  $dh/dx$ . Il est d'usage de poser  $n \propto D_{50}^{1/6}$  où  $D_{50}$  représente la médiane de la granulométrie. Cependant la macrorugosité  $n_c$  définie par la dissymétrie des sections est d'une amplitude quasi incommensurable. C'est elle qui, assurant l'amortissement de l'écoulement moyen, représente la rugosité efficace. Statistiquement on a en première approximation  $n_c/d = \text{constante}$ . Dans ce cas puisque  $d^{2/3} = d^{1/2}.d^{1/6}$ , on a:

$$u \propto (s.d)^{1/2}.$$

C'est l'équation de Chézy qui est ici un cas particulier de l'équation de Manning et non pas une approximation biaisée de celle-ci. Il existe une approche plus fondamentale dérivant de l'interprétation du profil logarithmique de la vitesse moyenne de la couche limite turbulente, mais son exposition demanderait de trop longs développements. En utilisant la relation  $d = \alpha x$ , on obtient avec  $\lambda^{1/2}$  comme coefficient de l'équation de Chézy:

$$-\alpha x \frac{dh}{dx} = \lambda u^2.$$

Pour autant que  $\alpha$  et  $u$  soient spatialement constants, on obtient l'équation d'un profil logarithmique. Par contre  $u^2/\alpha$  peut varier temporellement d'une crue à l'autre, et même pendant une crue si l'ajustement hydraulique local est suffisamment rapide par rapport à la vitesse de propagation de la crue, le profil restera identique.

Comparons maintenant le flux de sédiment  $q_s$  et le flux liquide  $q_w = u$ .  
L'approche en boîte noire suggère:

$$q_s = -k \frac{dh}{dt} = -\frac{x_T}{\tau} x \frac{dh}{dx} \propto s.d$$

Le cisaillement hydraulique appliqué au fond du chenal est donné par  $\sigma \approx \rho g d s$ ; d'où  $q_s \propto \sigma$ . Par contre le flux hydraulique  $u \propto (s.d)^{1/2} = \sigma^{1/2}$ . Cependant les variables mesurées sont les débits  $Q_s$  et  $Q_w$ . On a :

$$Q_w = u.w.d = u.\alpha.x.\beta.a = D_w.a$$

$D_w$  est le débit spécifique et

$$D_w = u \alpha \beta$$

On a mentionné en introduction que le débit spécifique sédimentaire est donné par:

$$D_s = \frac{h_m}{\tau}$$

Le profil hydraulique a pour équation différentielle:

$$-x \frac{dh}{dx} = \lambda u^2$$

Le profil hypsométrique de l'approche en boîte noire est:

$$H = -\ln X, \text{ soit } h = -h_m \ln(x/x_T).$$

On en déduit l'équation différentielle correspondante:

$$-x \frac{dh}{dx} = h_m$$

En identifiant les 2 équations, on a :

$$\lambda u^2 = h_m, \text{ soit } D_s = \lambda u^2 / \tau$$

La concentration  $C$  est définie par :

$$C = \frac{Q_s}{Q_w} = \frac{D_s}{D_w} = \frac{\lambda}{\alpha \beta \tau} u$$

Comme  $Q_w = u \alpha \beta a$ , on a finalement :

$$C = \frac{\lambda}{\alpha^2 \beta^2 \tau a} Q_w$$

Dans une station fixe, le coefficient de  $Q_w$  est constant. Un accroissement de concentration en fonction de  $Q_w$  est effectivement observé. Cependant la concentration diminue quand on se déplace vers l'aval comme le suggère le coefficient  $1/a$ . Ceci est en accord avec le modèle initial en boîte noire puisqu'en descendant de la zone de transfert l'eau de ruissellement s'accumule au pro rata de la surface drainée alors que la zone de production est restreinte à une bande étroite en hauteur.

Il apparaît à l'évidence que le transport en suspension n'est pas une advection passive, sinon  $C$  devrait être indépendant de  $Q_w$ . La précédente analyse laisse à penser que les sédiments en suspension sont maintenus par le cisaillement hydraulique de fond.

On aurait là un couplage dynamique entre écoulement hydraulique et charge de fond. On tente actuellement de modéliser le processus en partant de la sensibilité différentielle à la contrainte de fond. La séparation commode entre charge de fond et suspension apparaît arbitraire. Cependant en terme de bilan d'érosion la prépondérance des suspensions par rapport à la charge de fond résulte de la faiblesse relative de la vitesse d'écoulements majoritairement granulaires.

**“BILANS HYDRIQUE, ÉNERGÉTIQUE ET GÉOCHIMIQUE :  
APPLICATION À LA DÉCOMPOSITION DE L'HYDROGRAMME DE CRUE  
(BASSINS VERSANTS DE LA PISTE SAINT-ÉLIE, GUYANE).**

T. BARIAC et Équipe PEGI/Thème III

Dans le cadre d'une mise au point méthodologique relative à la décomposition géochimique des hydrogrammes, nous avons échantillonné des crues sur deux petits bassins versants (forêt primaire et graminées) de la Piste Saint-Elie, en Guyane.

Au cours de cette expérimentation (mai 1992 et 1993), nous avons prélevé et analysé des échantillons :

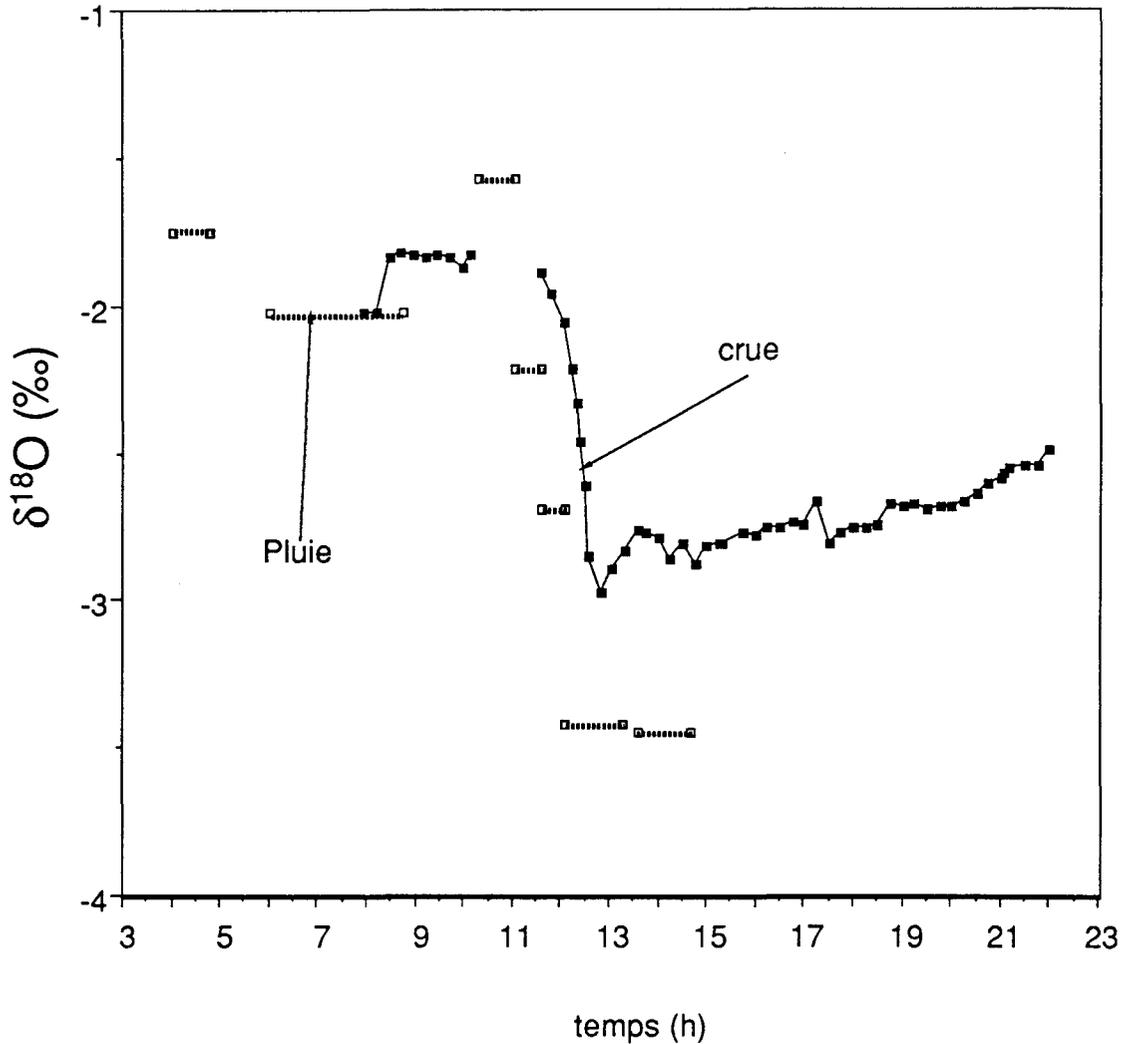
- de pluie, pour une détermination spatio-temporelle de la hauteur d'eau précipitée et du signal d'entrée géochimique à l'échelle du bassin versant;
- de la crue, à l'exutoire, pour une identification de l'origine de l'eau;
- de la crue, le long du thalweg, pour une identification éventuelle d'une compartimentation géochimique;
- des couches temporairement saturées du sol (superficielles et profondes) afin d'étudier la contribution respective de ces différents réservoirs à la crue.

Des relevés tensiométriques ont été effectués sur les deux bassins versants pendant et après la crue, afin de déterminer les zones de saturation des sols.

L'approche isotopique de la décomposition de l'hydrogramme de crue démontre l'existence d'une forte contribution d'une eau en provenance de la zone temporairement saturée du sol. La pluie directe et le ruissellement superficiel ne sont donc pas les seules composantes de l'hydrogramme. Cependant, l'outil isotopique, seul, est insuffisant pour apprécier la profondeur de l'eau mobilisée dans le sol, car sur ces sites, la variabilité temporelle de la signature isotopique de la pluie recouvre la variabilité spatiale de la signature isotopique de l'eau dans le sol. En effet, dans un diagramme  $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ , les compositions isotopiques de l'eau des différents échantillons se répartissent suivant la droite locale des eaux météoriques. Le sol ne subit donc pas d'évaporation et ce, en raison du rôle joué par des couverts végétaux à indice foliaire élevé. Ce résultat est confirmé par une étude bioclimatique réalisée en septembre 1992.

L'emploi de traceurs chimiques devient donc indispensable pour la caractérisation de l'eau issue des zones saturées du sol. L'utilisation combinée de ces différentes familles de traceurs (chimiques et isotopiques) rend possible l'identification et la quantification de la participation des différents réservoirs d'eau à l'écoulement de crue. Il devient alors possible de séparer les hydrogrammes en composantes simples (pluie directe et ruissellement superficiel, eau issue des couches superficielles et profondes du sol).

Cette étude a mis en évidence l'intérêt de l'utilisation combinée des informations chimiques, isotopiques et tensiométriques pour la séparation des hydrogrammes de crue. Une étude hydrodynamique est en cours d'élaboration pour préciser le chemin parcouru par l'eau et modéliser le comportement hydrologique des bassins.



Evolution des teneurs en oxygène 18 de la pluie et de la crue prélevées le 24 mai 1992 sur un bassin versant en forêt primaire (Piste Saint Elie, Guyane)