

Hydrologie et géochimie
du bassin soudano-sahélien du fleuve Niger

*Hydrological and geochemical studies
on the Sahelo-Sudanian Basin of the Niger River*

J.-C. OLIVRY

RÉSUMÉ – Les chroniques hydrologiques du Niger supérieur et de sa cuvette lacustre montrent un appauvrissement de la ressource en eau depuis deux décennies lié aux déficits pluviométriques et à l'amenuisement des ressources souterraines. La cuvette lacustre – et son delta intérieur – constitue un hydro-système particulier de lacs et de plaines d'inondation où les pertes annuelles, dues essentiellement à l'évaporation, varient de 40 km³ à 6 km³, soit 47 % des entrées en période humide et 30 % en période sèche du fait de la réduction des zones inondées.

Des recherches plus complètes sur les flux du Niger (isotopie, chimie, sédimentologie), entreprises depuis 1990, montrent notamment qu'environ un quart des charges en suspension et dissoutes se dépose dans le Delta intérieur pour un flux global d'entrée de 2,2 Mt en 1992-1993. L'évolution de la chimie des eaux et les variations saisonnières de la charge solide, en amont et en aval du Delta intérieur, permettent de préciser le fonctionnement de l'hydrosystème. Faute d'observer l'existence d'un bassin sédimentaire ancien, l'importance relativement faible des dépôts de matière dans la cuvette lacustre doit être ramenée à la vaste extension des zones de dépôts.

Mots clés : Afrique, fleuve Niger, Mali, sédimentologie, hydrologie isotopique, ressources en eau.

*

ABSTRACT – The Niger River is the third largest African river. The Upper Niger is defined before the inner Delta at the station of Koulikoro. In addition with the Bani River, its surface basin is of 250 000 km². The Niger River flows from the humid Guinean mounts (more than 1500 mm year⁻¹ precipi-

tations) to the semi-arid areas (less than 200 mm year⁻¹ precipitations). Hydrological parameters are defined. African drought and rainfall deficits observed during the last twenty years had important repercussions on the runoff of the Niger River (annual deficit of 20 % during the 70's and of 46 % during the 80's). A large reduction of the groundwater storage explains the persistent degradation of the hydrological resource. The inner Delta of the Niger River is a particular system submitted to Sahelian and subdesertic climatic conditions, and is characterized by large flood plains. Time series of input water volumes in the inner Delta and of the water losses inside it show that the water losses, due to the intense evaporation, vary from 40 km³ to 6 km³. The water losses are maximum during the wettest years, up to 47 %, and minimum during the driest years, only 32%, due to the reduction of the flooded area.

Since 1990 the EQUANIS program associates hydrological and chemical measurements in the study of the dissolved and suspended matter flows in the Niger River's flows to the Sahel. First results on the upper basin and after the inner Delta show low concentrations of matter. The specific sediment load vary between 7 or 8 t km² year⁻¹ for the upper Niger River and 3 t km² year⁻¹ for the Bani River. The specific dissolved load vary between 10 or 12 t km² year⁻¹ for the Niger River and 2,5 t km² year⁻¹ for the Bani River. The annual input in the inner Delta was about 2,2 Mt in 1992-1993. Sediment and chemical budgets show a sediment deposit of 0,24 Mt and a saline deposit of 0,3 Mt in the inner Delta. Seasonal variations of the matter fluxes are very different between the upper and the lower parts of the inner Delta, due to the breaking of the annual flood and to the more important flood plains in the upper Delta. The preliminary results indicate that both rivers have a low level in dissolved element concentration. The mean conductivity values ranging from 50 to 80 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ increase regularly during low water stage and decrease drastically with swelling. The pH values are slightly basic, from 7,1 to 8. Silica and bicarbonates are the main dissolved species ; they always represent more than 75 % of the dissolved load. In May, when rising stage begins, the waters are poorly mineralized at the input of the Delta while they have been enriched during the dry season in the Delta. A good mass balance is found between inputs and outputs through the Delta.

The inner Delta is not an old sedimentary basin and the actual deposits of matter should characterize its working during the lasting deficit of the water resources of the Niger River.

Keywords : Africa, Niger River, Mali, sedimentology, isotopic hydrology, water resources.

INTRODUCTION

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 hydriques et de matières particulaires et dissoutes et à développer sur le Niger les recherches biogéohydrodynamiques des grands écosystèmes relevant de la thématique du Programme sur l'Environnement de la Géosphère Intertropicale (PEGI, INSU/ORSTOM).

Le projet EQUANIS est malheureusement le dernier exemple d'une dynamique initiée directement par Jean-Charles Fontes associant, depuis plus de vingt-cinq ans, en collaboration avec les hydrologues de l'Orstom, les recherches sur les régimes hydrologiques, sur l'érosion et la qualité des eaux, sur l'hydrologie isotopique, sur la climatologie et la paléohydrologie et sur l'hydrogéologie en milieu intertropical (Fontes, 1976).

Les quelques résultats présentés ici, en hommage à la mémoire de Jean-Charles Fontes, apportent un éclairage nouveau sur le fonctionnement du fleuve Niger notamment dans sa traversée de la cuvette lacustre.

I. HYDROLOGIE DU NIGER ET DE SA CUVETTE LACUSTRE

Issu de la dorsale guinéenne qui sépare la moyenne Guinée et la Guinée forestière de la Sierra Leone et du Liberia, le Niger, troisième fleuve d'Afrique par sa longueur (4 200 km), s'écoule suivant une direction générale Nord-Est jusqu'aux confins du Sahara. Il décrit une grande boucle dans sa traversée des régions sahéliennes et subdésertiques où il perd dans la cuvette lacustre une bonne part de ses apports hydriques avant de retrouver la route de l'océan au fond du golfe de Guinée où son régime est devenu tout à fait original pour la région.

A. Hydrologie du Niger supérieur

Le Niger supérieur a un régime tropical plus classique. Le haut Niger reçoit sur le territoire guinéen en amont de Siguiri trois affluents importants : le Tinkisso, le Niandian et le Milo puis parvenu au Mali, il reçoit à l'amont de Bamako, le Sankarani d'origine essentiellement guinéenne. Le Niger ne reçoit plus ensuite que des affluents mineurs jusqu'à sa confluence avec le Bani à Mopti dont le bassin versant est à peine plus petit que celui du Niger supérieur (Fig. 1).

La durée et l'abondance plus ou moins grandes des précipitations et l'extension des différentes zones climatiques intéressant le bassin du Niger supérieur permettent de distinguer :

- **Le domaine guinéen** qui concerne les têtes de bassin du Niger et de ses affluents. Le climat tropical de transition est appelé ici climat guinéen ; les précipitations annuelles sont supérieures à 1 500 mm.

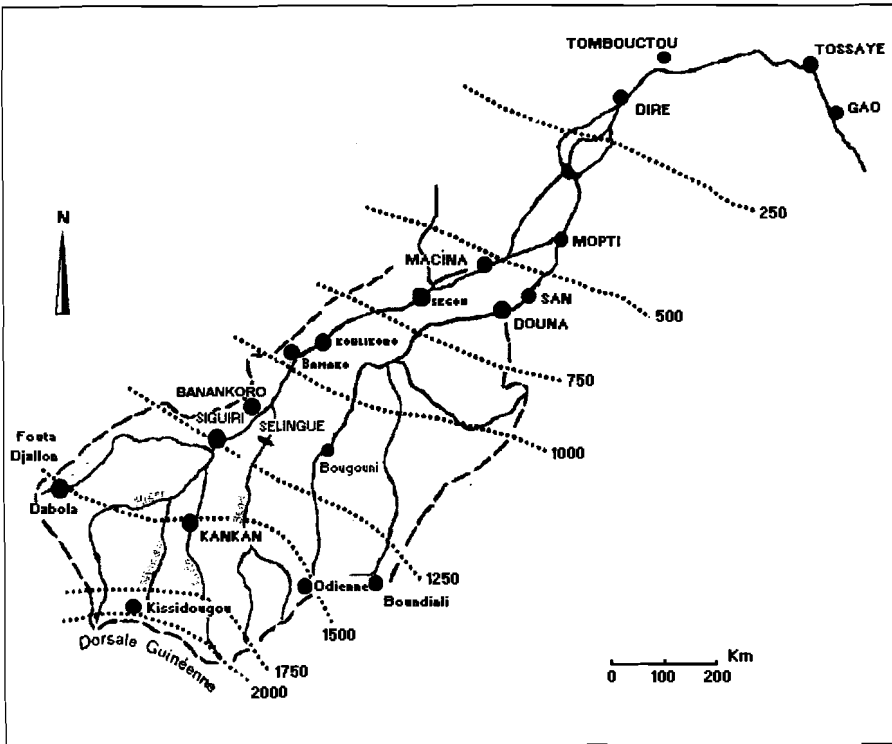


FIGURE 1.

Bassin du Niger et isohyètes interannuelles en millimètres.

Niger river basin and interannual isohyetal lines in mm.

- **Le domaine sud-soudanien** correspondant au climat tropical pur. Il est centré sur Siguiri-Bougouni-Sikasso. Les précipitations annuelles sont comprises entre 1 000 et 1 500 mm.
- **Le domaine nord-soudanien** qui constitue une variante plus sèche avec des précipitations comprises entre 750 et 1000 mm.
- **Le domaine sahélien**, avec des précipitations comprises entre 400 et 750 mm et réparties sur 3 à 4 mois, qui intéresse les régions de Ségou, Mopti et la partie sud de la cuvette lacustre.
- **Le domaine subdésertique**, recevant autour de 250 mm de précipitations (150-400 mm) réparties sur les 3 mois d'été, qui intéresse la majeure partie de la cuvette lacustre.

Pour toutes ces régions climatiques, la saison des pluies est centrée sur le mois d'août.

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 hydro-climatiques 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 ; à cette station, la superficie du bassin versant est de 120 000 km², dont seulement un cinquième au Mali. Le débit moyen interannuel calculé sur 83 ans est de 1 420 m³ s⁻¹ soit un module spécifique (ramené à l'unité de surface) de 11,8 l s⁻¹ km⁻². Avec une hauteur de précipitation interannuelle estimée à 1 600 mm et une lame d'eau écoulee de 370 mm, le coefficient d'écoulement moyen atteint 23 % ; la reprise par évaporation serait de 1 230 mm (Brunet-Moret *et al.*, 1986).

La chronique des modules du Niger à Koulikoro a souvent été comparée à celle du fleuve Sénégal. Dans la période récente on a relevé qu'en dépit de certains sursauts d'une relative abondance en 1974, 1975, 1976, puis en 1979, l'hydraulicité des fleuves de la région n'a cessé de se dégrader, d'abord dans les années 72-73, première sécheresse catastrophique, puis de manière plus dramatique encore dans les années 1983 et 1984. La figure 2 reproduit la chronique des modules du Niger à Koulikoro et Diré et du Bani à Douana.

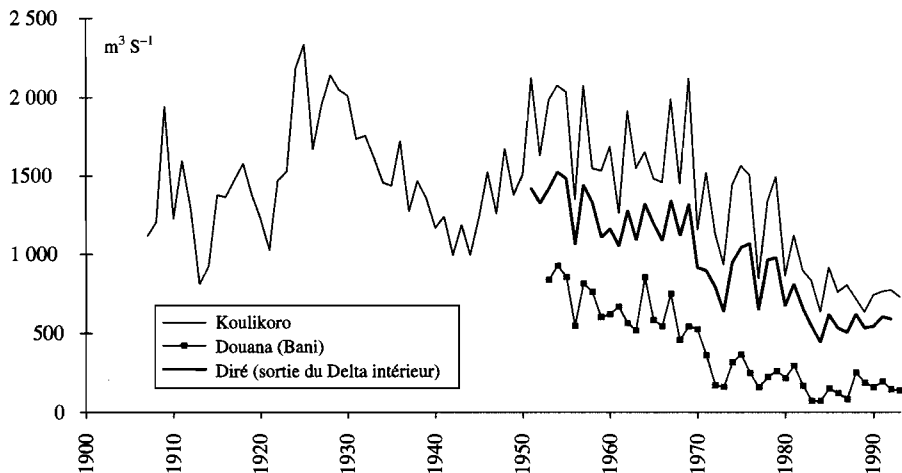


FIGURE 2.

Évolution des modules annuels, depuis l'origine des observations, du Niger à Koulikoro et Diré et du Bani à Douana.

Annual discharges variations, since the beginning of the observations, for the Niger at Koulikoro and Diré and for the Bani at Douana.

Soulignons qu'après le « minimum minimorum » de 1984, le module le plus bas est celui de 1989 sur le Niger.

Les fluctuations récentes montrent que la ressource en eaux de surface a diminué de moitié sur la dernière décennie (Olivry *et al*, 1995a).

On a montré que l'appauvrissement des ressources en eau de l'Afrique intertropicale résultait à la fois de la crise climatique que connaît le continent africain et de l'effet cumulé des déficits pluviométriques. La persistance de déficits hydriques aigus, au delà des crises majeures des précipitations, indique que les fluctuations hydrologiques ne peuvent être traitées au seul pas de temps annuel.

L'implication des aquifères des bassins – leur épuisement, la réduction de leur extension – à travers la contribution des écoulements de base, conduit à une minoration durable de l'abondance de la ressource hydrologique dans la région. Un éventuel retour à des conditions de précipitations excédentaires devra être soutenu sur plusieurs années pour permettre la reconstitution des aquifères et un retour à des conditions hydrologiques « normales ».

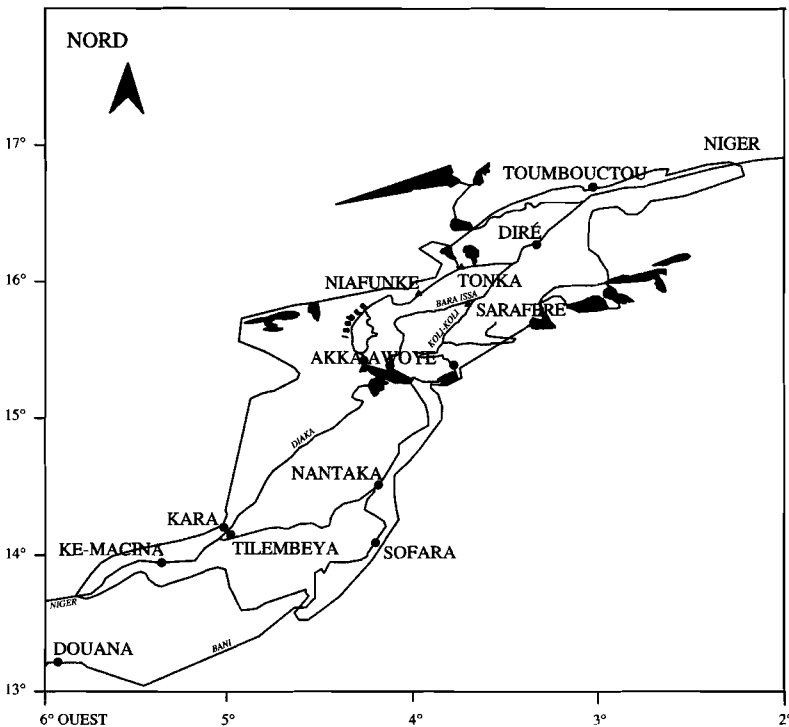


FIGURE 3.

Carte de situation de la cuvette lacustre.

Location map of the inner Delta.

B. La cuvette lacustre

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 km² suivant un rectangle orienté SO-NE de 450 km de longueur sur 125 km de largeur (Fig. 3).

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 ;
- des conditions morphologiques et climatologiques propres au Delta intérieur, régissant les écoulements (défluences, inondations) et le bilan hydrologique (évaporation, infiltration).

Le tableau 1 rappelle pour trois années-type (humide, moyenne et sèche) les débits moyens annuels aux principales stations de Koulikoro, Douna et du Delta. L'année 1954 correspond à une année humide de fréquence cinquantennale ; 1968 est très voisine de la moyenne et 1985 à une fréquence cinquantennale sèche. 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 exprimées en km³ a été comparée dans la figure 4 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'étude des pertes annuelles montre que l'on passe de 29 km³ entre les entrées et Diré pour la période humide, à 7 km³ pour la période sèche soit un rapport de 4,14 (valeurs extrêmes : 40 et 6 km³).

II. TRANSPORTS DE MATIÈRES

A - Régime du transport de matières en suspension

L'étude des matières en suspension dans les eaux des bassins amont montre des variations saisonnières des concentrations caractéristiques des fleuves

TABLEAU 1.

Exemples de variation des modules, de Koulikoro à Tossaye, pour trois années hydrologiquement contrastées ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$).

Station	Année humide (1954)	Année moyenne (1968)	Année sèche (1985)
Koulikoro	2075	1445	915
Ké Macina	1951	1306	765
Bani Douna	926	456	150
Bani Sofara	646	382	130
Diaka Kara	642	409	255
Niger Mopti	1702	1098	604
Diré	1522	1118	619
Tossaye	1457	1033	574

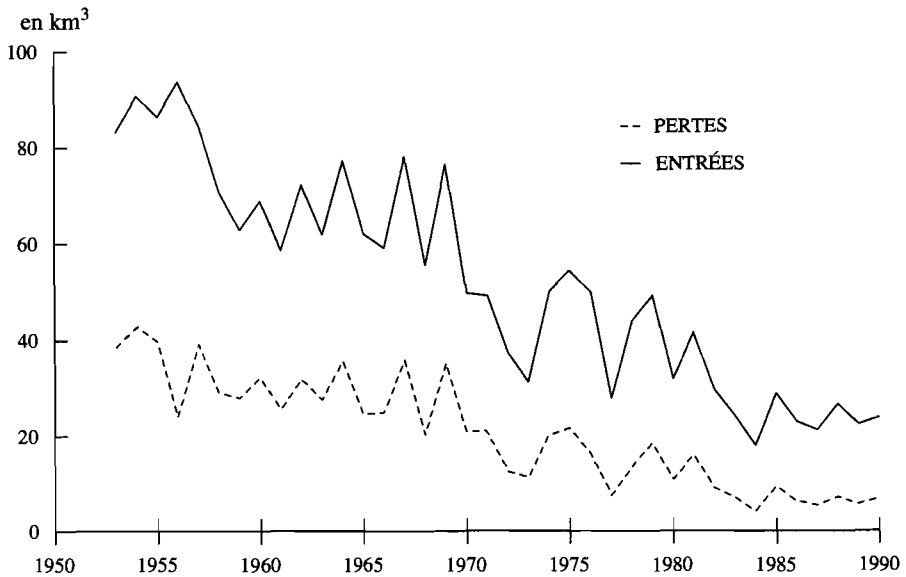


FIGURE 4.

Évolution des volumes des apports annuels du bassin supérieure en milliards de m^3 (km^3) mesurés sur Ké-Macina et Douna et pertes correspondantes à l'aval du Delta Central (Diré).

Water inputs (Ké-Macina and Douna) and losses in the inner Delta (Diré) in km^3 .

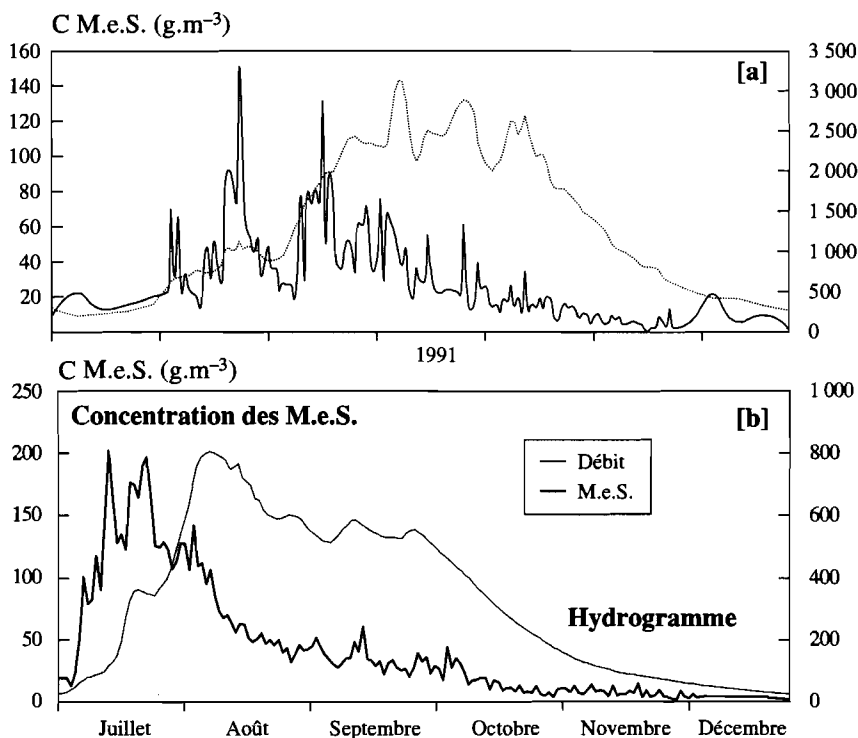


FIGURE 5.

Exemples d'hydrogrammes et de concentrations en M.e.S. pour le Niger à Koulikoro (a) et le Bani à Douna (b).

Hydrograph and TSS concentrations for the Niger at Koulikoro (a) and the Bani at Douna (b).

tropicaux. Les concentrations les plus élevées correspondent au début de la saison des pluies. Elles dépassent rarement 100 mg l^{-1} pour le Niger et 200 à 250 mg l^{-1} pour le Bani. Elles tombent en saison de basses eaux jusqu'à 5 mg l^{-1} et, compte tenu des débits, le transport de matière devient alors pratiquement négligeable.

La figure 5 illustre pour le Bani et le Niger supérieur, les variations de concentration des matières en suspension et celles des débits liquides. Les pics de concentration précèdent la crue hydrologique. Les concentrations ont considérablement diminué au moment du maximum de la crue suivant une décroissance assez régulière sur le Bani, plus variable sur le Niger. L'hystérésis de la relation concentrations-débits illustrée pour le Bani (Fig. 6) correspond à un phénomène classique en zone tropicale.

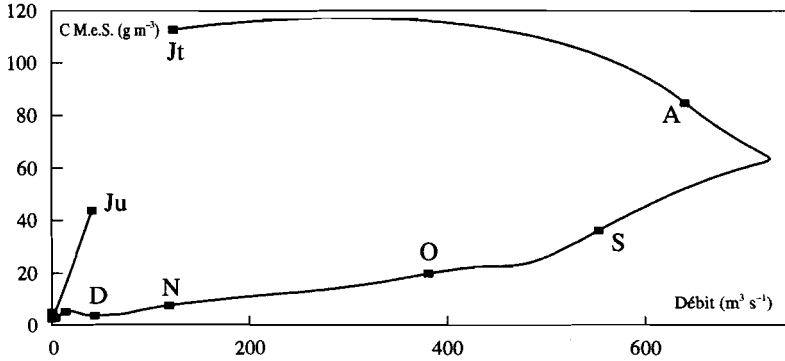


FIGURE 6.

Exemple de relation Concentration – Débits pour le Bani à Douna.

Suspended load concentration vs discharges for the Bani at Douna.

La figure 7 donne pour la période d'observation les histogrammes des concentrations moyennes mensuelles des matières en suspension et la courbe de variation des débits mensuels correspondants pour les trois stations principales du bassin amont. Les concentrations moyennes annuelles varient de 28 à 36 mg l^{-1} sur le Niger et de 53 à 59 mg l^{-1} pour le Bani ; ces valeurs sont très faibles en comparaison des observations effectuées dans la même zone climatique de l'Afrique ; ainsi, Gac (1980) donne dans son étude sur le bassin du lac Tchad des concentrations moyennes annuelles sur le Logone à Kousseri de 117 mg l^{-1} et 159 mg l^{-1} respectivement en année humide et sèche, et sur le Chari à N'Djaména, pour les mêmes années caractéristiques, de 73 et 97 mg l^{-1} . Sur le Sénégal (Orange, 1990) la concentration moyenne de la charge annuelle en suspension est de 230 mg l^{-1} sur neuf années de la décennie 80.

La variation des flux de matière est très dépendante de celle de l'hydrogramme de crue du Niger et du Bani, et les maximums d'exportations de matière coïncident avec la période des très hautes eaux. Les débits solides maximum ont atteint des valeurs de 100 à 130 kg s^{-1} à la station de Banankoro, de 160 à 200 kg s^{-1} à Koulikoro et de 60 à 120 kg s^{-1} sur le Bani à Douna (Olivry *et al.*, 1995b).

Le bilan annuel des exportations de matières en suspension est indiqué dans le tableau 2.

En terme d'érosion spécifique, les valeurs de la dégradation moyenne annuelle varient de 8,1 à 6,6 $\text{t km}^{-2} \text{an}^{-1}$ pour le Niger à Banankoro et le Niger à Koulikoro, et de 3,2 à 2,5 $\text{t km}^{-2} \text{an}^{-1}$ seulement, pour le Bani à Douna.

Ces très faibles dégradations, liées pour une part à la faible hydraulicité des cours d'eau, doivent être rapprochées de celles du bassin actif du fleuve

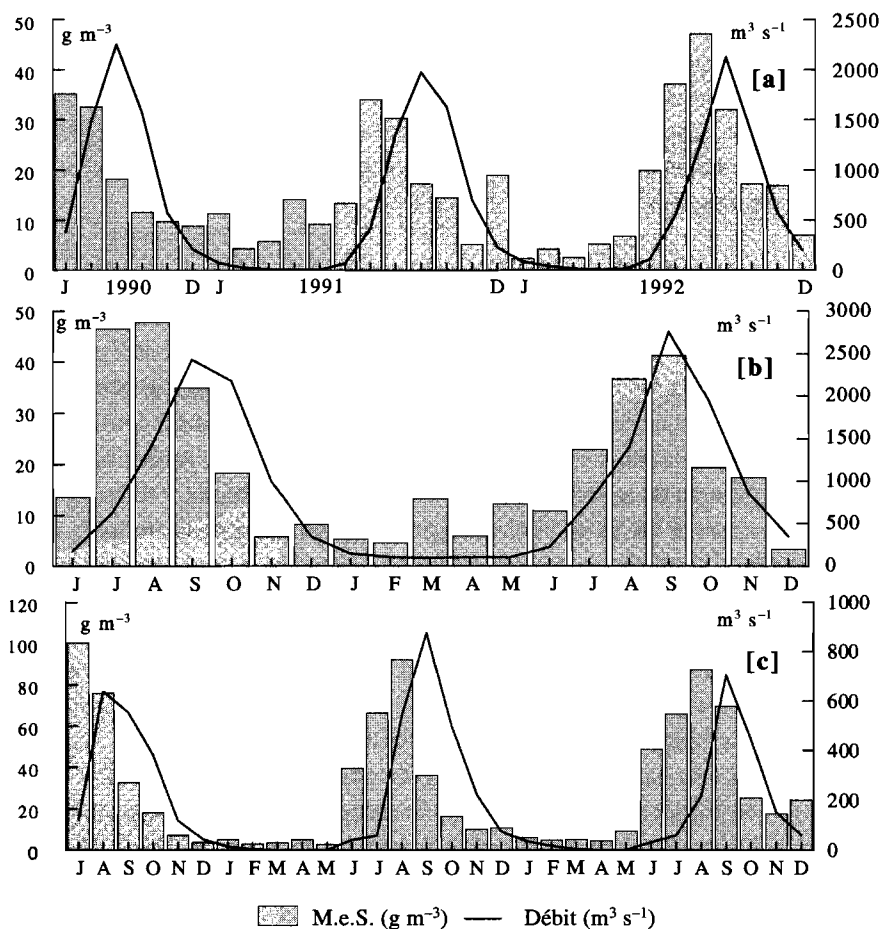


FIGURE 7

Concentrations mensuelles des suspensions et débits mensuels pour le Niger à Banankoro (a), le Niger à Koulikoro (b) et le Bani à Douna (c).

Monthly concentrations of suspended matters and monthly discharges for the Niger at Banankoro (a) and Koulikoro (b) and for the Bani at Douna (c).

TABLEAU 2.

Flux annuels de matières en suspension (en tonnes) sur le Niger et le Bani supérieurs.

Année hydrologique	Niger à Banankoro	Niger à Koulikoro	Bani à Douna
1990-1991	—	—	283 000
1991-1992	579 000	890 000	325 000
1992-1993	476 000	760 000	253 000

Sénégal dont la valeur moyenne est de $16,7 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ sur 9 années récentes déficitaires (Gac et Orange, 1990).

Cette différence peut en partie s'expliquer par l'importance relative plus grande sur le bassin du Sénégal que sur le bassin du Niger, du plateau mandingue à couverture latéritique plus érodable. Les hauts bassins guinéens des deux fleuves sont moins sensibles à l'érosion.

B. Régime du transport des matières dissoutes

L'étude des transports des matières dissoutes en terme de concentrations, de flux et de variations saisonnières a été menée conjointement à celle des matières en suspension. Les concentrations sont comprises entre 30 et 80 mg l^{-1} pour le Niger à Banankoro, entre 20 et 100 mg l^{-1} 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 en valeur relative par rapport à l'écoulement de base. L'augmentation progressive des concentrations pendant la crue annuelle traduit une contribution de plus en plus importante des apports d'origine souterraine. Enfin, à la décrue, avec la fin des écoulements superficiels, la phase de tarissement est marquée par une augmentation plus forte des concentrations.

L'amplitude des variations de concentrations est moindre pour le Niger à Koulikoro et le Niger à Ké-Macina. Les débits de saison sèche sont soutenus par les lâchures du barrage de Sélingué (volume de retenue de 2.10^9 m^3) ; ces apports de la retenue, essentiellement liés aux écoulements superficiels de la saison des pluies précédente, sont moins concentrés en éléments dissous.

La figure 8 illustre par quelques exemples ces variations de concentration au cours de l'année.

Les flux annuels de matières dissoutes observés en 1991 et en 1992 sont respectivement :

- de 690 000 et 840 000 t sur le Niger à Banankoro,
- de 960 000 et 936 000 t sur le Niger à Koulikoro,
- de 275 000 et 255 000 t sur le Bani à Douna.

La différence entre 1991 et 1992 sur les apports intermédiaires entre Banankoro et Koulikoro dont l'essentiel provient du Sankarani, varie du simple à plus du double. Cet aspect devra être précisé au cours des prochaines années de prélèvement.

Les flux spécifiques de matières dissoutes observés sont de l'ordre de $11 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ sur le Niger à Banankoro, de $8 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ sur le Niger à Koulikoro et seulement de $2,6 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ sur le Bani à Douna.

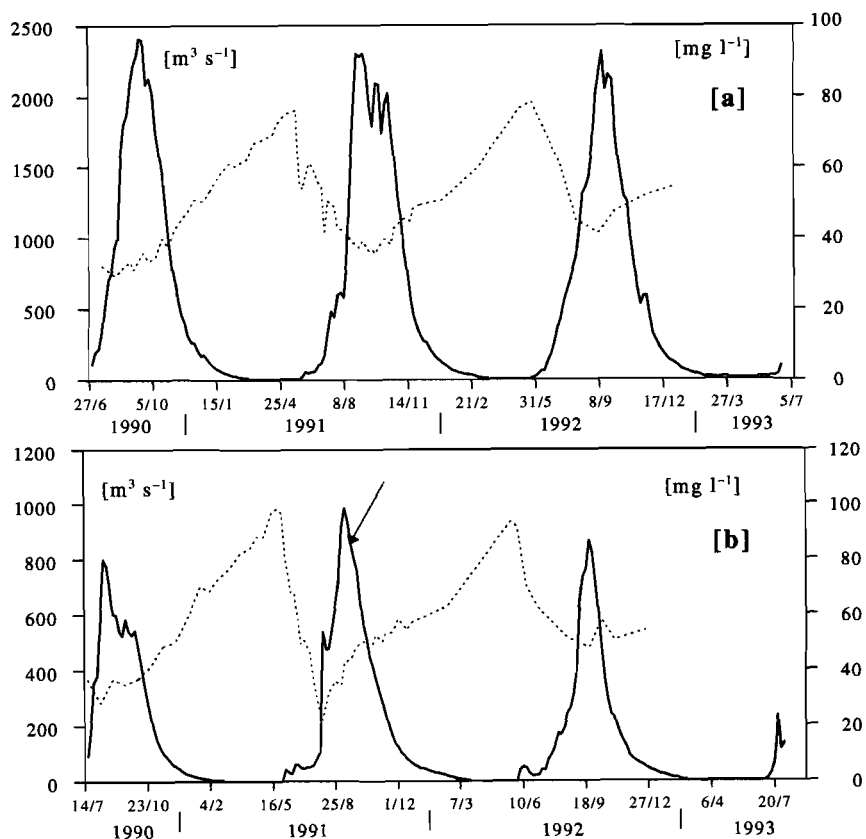


FIGURE 8.

Concentrations des matières dissoutes (courbe en points) et débits journaliers (trait plein) pour le Niger à Banankoro (a) et le Bani à Douna (b).

Dissolved matter concentrations (dotted line) and daily discharges (solid line) for the Niger at Banankoro (a) and the Bani at Douna (b).

C. Mesures isotopiques des eaux du Niger à Banankoro et du Bani à Douna

Deux séries de prélèvements ont été effectués par l'ORSTOM sur le fleuve Niger à Banankoro du 7/7/1990 au 17/4/1991 et sur le fleuve Bani à Douna du 9/7/1990 au 18/4/1991. Les analyses des isotopes stables ^{18}O et ^2H faites par l'AIEA permettent de donner un premier aperçu sur les eaux du bassin supérieur du Niger et du Bani et devraient être comparées aux résultats acquis sur les nappes souterraines de la région (Fontes *et al.*, 1991).

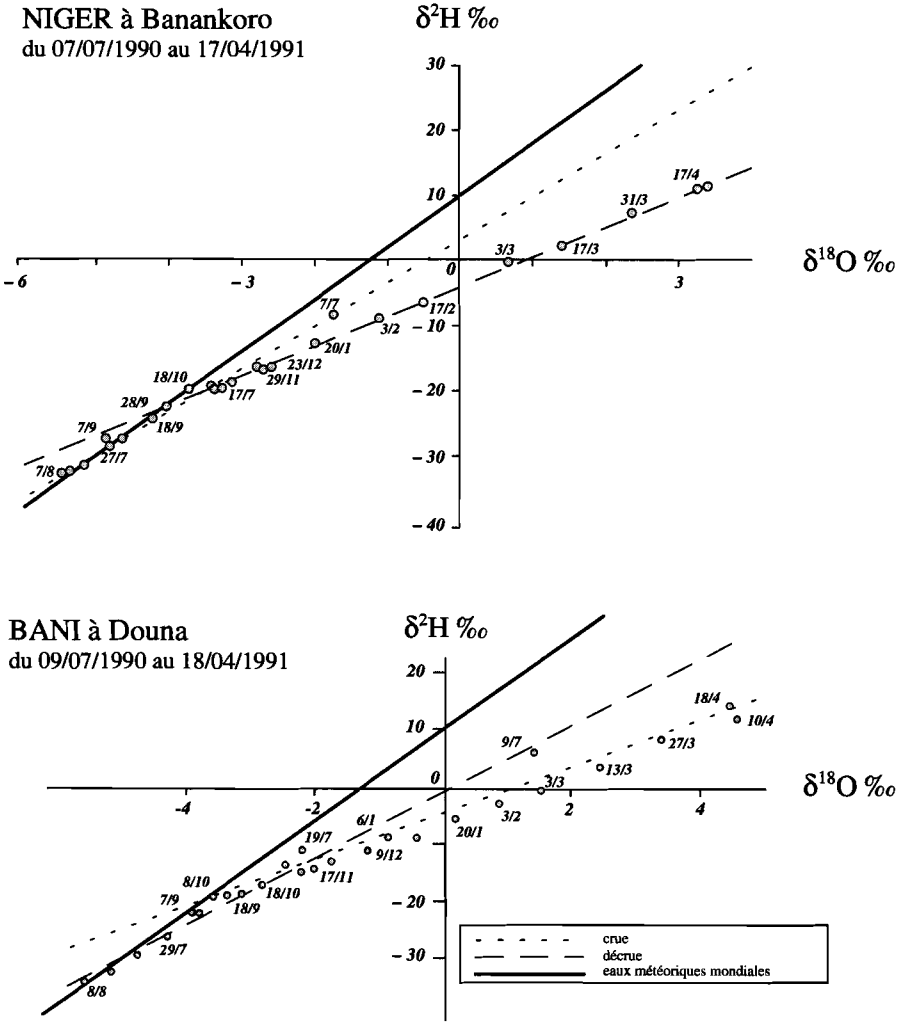


FIGURE 9.

Variations de la composition isotopique moyenne des eaux pour le Niger à Banankoro (a) et le Bani à Douna (b)

Fluctuations of the isotopical composition of waters for the Niger at Banankoro and the Bani at Douna.

Sur le Niger à Banankoro, l'évolution au cours de l'année est marquée au début de la saison des pluies (juillet) par une diminution rapide des teneurs en isotopes lourds, par lessivage direct. Un enrichissement débute en août alors que l'hivernage n'est pas terminé et que le débit du fleuve continue à augmenter. La nappe du socle qui existe dans cette région présente un horizon superficiel d'altérite épaisse perméable qui favorise un écoulement latéral de type ruissellement différé qui est évacué par le réseau de surface. Cet horizon est enrichi en isotopes sous l'effet de l'évaporation durant la saison sèche. Les premières pluies, par infiltration et effet piston, en permettent l'écoulement vers le Niger. En amont de Banankoro, à partir de Siguiri (Guinée), il existe quelques plaines d'inondation dont les grandes surfaces permettent un enrichissement par fractionnement isotopique dû à l'évaporation. Ces plaines se vidangent dans le fleuve et peuvent également jouer un rôle dans l'enrichissement observé. D'autres études ont montré qu'un enrichissement dû à cet horizon perméable avait lieu, mais tout au début de la saison des pluies (juin). Le retard observé à Banankoro pourrait être dû à la présence d'un front d'infiltration suivi d'un lessivage par les eaux d'infiltration (Gourcy, 1994).

Dès la décrue, l'évaporation domine et permet un enrichissement progressif en isotopes lourds des eaux du fleuve.

La relation $\delta^{18}\text{O} / \delta^2\text{H}$ montre que deux droites de régression peuvent être établies, l'une pour la période de crue et l'autre pour la période de décrue (Fig. 9). Les pentes de ces deux droites respectivement + 6,63 et + 4,58 indiquent une évaporation. Les points d'intersection de ces droites avec la droite des eaux météoriques mondiales donnent la composition de l'eau d'origine. Ces eaux se placent sur la droite de la chronique des eaux de pluies à Bamako ($\delta^2\text{H} = 5,8 * \delta^{18}\text{O} - 0,9$).

Sur le Bani, l'évolution au cours de l'année est très classique ; elle montre une diminution des teneurs durant la crue, due à l'apport des eaux de pluies. Dès le début de la décrue, l'évaporation agit sur la surface d'eau libre et un enrichissement en isotopes lourds par fractionnement isotopique a lieu.

La relation $\delta^{18}\text{O} / \delta^2\text{H}$ montre, là aussi, que deux droites ont pu être définies pour la crue et la décrue. Les pentes trouvées sont de + 5,81 et + 4,24 et correspondent à des eaux évaporées. Les points d'intersection avec la droite des eaux mondiales pour la crue et la décrue montrent que ces eaux sont les mêmes qu'à Banankoro. Les effets de continentalité et de latitude jouent un rôle négligeable. Les sources de ces deux fleuves se trouvent dans une région comprise entre les latitudes 8° et 13° nord et les longitudes 12° et 6° ouest.

III. BILAN ET VARIATION DES FLUX DE MATIÈRES DANS LA CUVETTE LACUSTRE

Au stade actuel des investigations, l'interprétation des résultats disponibles reste provisoire ; certains constats demanderont à être vérifiés par les mesures en cours de réalisation. La traversée de la cuvette lacustre et du Delta intérieur du Niger avec ses écoulements très lents, ses plaines d'inondation conduit à de notables modifications de la charge en suspension et dissoute du fleuve. On peut distinguer deux parties dans le Delta intérieur :

- une partie amont de vastes zones d'épandage encore largement inondées par la crue annuelle malgré le déficit hydropluviométrique, qui se termine au lac Débo, anévrisme majeur et permanent du réseau hydrographique de la région ;
- une partie aval où une géomorphologie très différente, caractérisée par la surimposition aux formes deltaïques antérieures d'un erg holocène, orienté est - ouest, conduit à observer un réseau hydrographique très diffus souvent commandé par les sillons interdunaires, avec des zones d'inondation plus réduites.

L'étude s'appuie sur les observations effectuées aux entrées amont du Delta (stations de Ké-Macina et Douna), aux sorties du Lac Débo et aux sorties du Delta aval à la station de Diré.

A. Bilan annuel des flux de matières

Le Niger et le Bani ont apporté au Delta un flux annuel de matières en suspension de 1 à 1,2 millions de tonnes en 1991 et 1992.

Le flux de matières dissoutes parvenant au Delta est de 1,2 millions de tonnes pour ces deux mêmes années.

Le bilan général de l'évolution de ces flux calculés sur l'année hydrologique 1992-1993 montre que la charge globale mesurée à Diré tombe à 790 000 t pour les suspensions et à 890 000 t pour les matières dissoutes. L'ensemble du Delta intérieur a retenu 244 000 t de suspensions et 300 000 t de sels.

Le tableau 3 donne le détail des pertes annuelles observées en 1992-1993. Les mesures intermédiaires effectuées aux sorties du Lac Débo montrent un comportement très différent des parties amont et aval du Delta intérieur.

Ainsi le bilan annuel met en évidence un piégeage de 331 000 t de suspensions avant le lac Débo et au contraire un gain de 87 000 t entre le lac Débo et Diré (Fig. 10).

Il y a décantation dans les plaines d'inondation de la zone amont de près d'un tiers de la charge solide alors que les phénomènes de reprise dans la zone aval excèdent largement la décantation. Le calcul des concentrations moyennes annuelles des matières en suspension (MES) suggère deux fonctionnements :

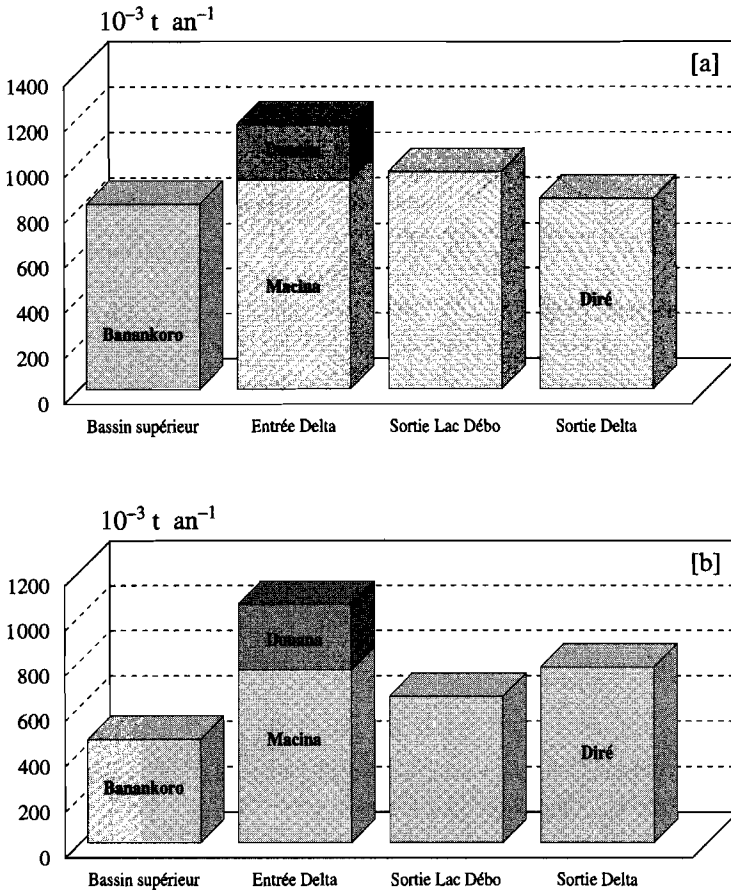


FIGURE 10.

Bilan annuel (1992-1993) des transports dissous (a) et particulaires (b) du fleuve Niger.
Annual budget (1992-1993) of the dissolved load (a) and suspended load (b) of the Niger river.

- **partie amont du Delta** : la baisse de concentration des MES ($-8,4 \text{ mg l}^{-1}$) pourrait indiquer qu'au piègeage de matière lié aux pertes en eau dans les plaines d'inondation s'ajoute une décantation des suspensions des eaux faisant retour au réseau en décrue.
- **partie aval du Delta** : la concentration augmente par rapport aux sorties du lac Débo ; les apports complémentaires, dus probablement aux reprises de berges par effet du vent ou dépôts de poussières atmosphériques mais aussi à des possibles transferts du dissous au particulaire d'origine biolo-

TABLEAU 3.

Bilan des flux hydriques et de matières dans le Delta intérieur du Niger
Année 1992 - 1993

	Écoulement 10 ⁹ m ³	Suspensions		Matières dissoutes	
		tonnage 10 ³ t	concentration g m ⁻³	tonnage 10 ³ t	concentration g m ⁻³
Entrées					
Ké-Macina + Douna	24,22	1 034	(42,7)	1 189	(49,1)
Pertes amont	3,72	331		213	
Sorties du lac Débo	20,5	703	(34,3)	976	(47,6)
Pertes aval	2,46	- 87 (gain)		87	
Sorties à Diré	18,04	790	(43,8)	889	(49,2)
Pertes totales	6,18	244		300	

gique (diatomées), s'associent à l'évaporation au fil des écoulements pour reconcentrer les suspensions à Diré.

Les concentrations moyennes de la matière dissoute n'ont pratiquement pas varié dans la traversée du Delta intérieur.

Un dépôt de 300 000 t de sels dans la cuvette lacustre, dont plus des 2/3 dans la partie amont, ne représente qu'une lame équivalente de 1/100^e de mm sur la superficie des zones inondées dans la période déficitaire actuelle, mais les conséquences à long terme de tels dépôts devraient être perceptibles ; c'est bien ce que montrent les cartes de conductivité moyenne des nappes superficielles établies par la Direction nationale de l'hydraulique où un enrichissement en sel apparaît nettement par rapport aux nappes extérieures à la zone ; en outre, dans les lacs de rive droite du Niger, des dépôts et encroûtements salins sont signalés. Il n'est pas exclu qu'un fonctionnement du type lac Tchad (dunes du Kanem) limite de manière conséquente l'incidence de ces pertes en sels dans le Delta proprement dit (Roche, 1973). La carte de la figure 11 illustre les bilans annuels des flux aux stations d'observation du Delta intérieur. Le suivi des variations mensuelles des flux de matières amène quelques informations complémentaires sur le fonctionnement hydro-dynamique du Niger dans sa traversée du Delta.

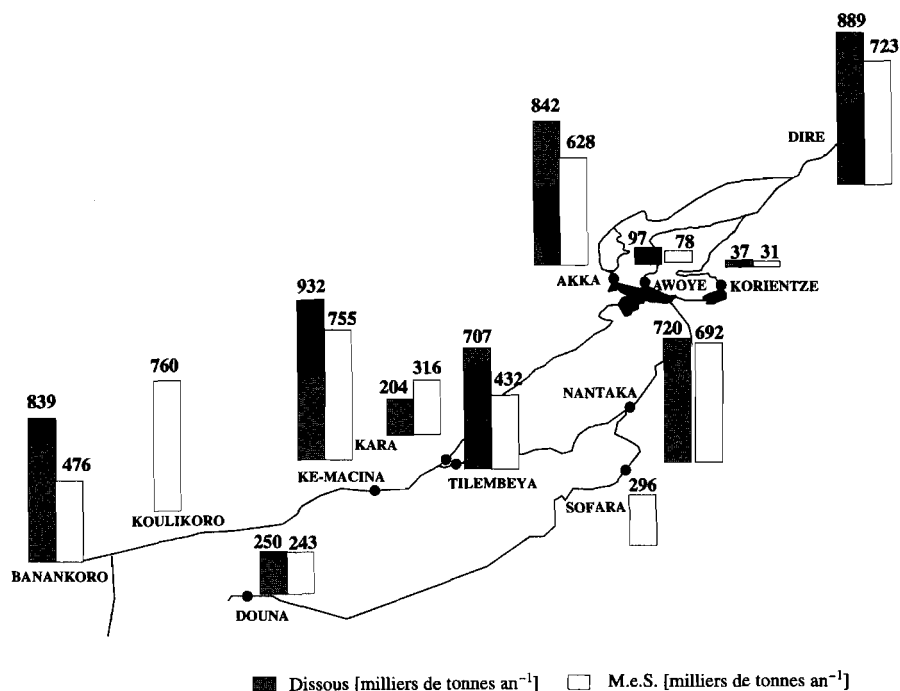


FIGURE 11.

Variation spatiale des transports dissous et particuliers du fleuve Niger en 1992-1993.
Spatial variation of the dissolved and sediment transports for the Niger river in 1992-1993.

B. Variations saisonnières des flux de matières

Le bilan mensuel des flux de matières en suspension a été établi entre les entrées amont et les sorties du lac Débo et entre le lac Débo et la sortie aval à Diré sur l'année hydrologique 1992-1993.

Les flux de sortie du Delta amont sont supérieurs aux entrées en mai, juin et juillet ; la fin de la saison des basses eaux se manifeste par une reprise des berges dans le lit mineur du fleuve. En août, septembre, octobre et novembre, avec l'inondation de la crue annuelle, des pertes importantes sont observées ; elles sont maximales en septembre avec un piégeage de 230 000 t. À partir de décembre, il y a restitution d'une petite partie du stock piégé.

Sur le Delta aval, le comportement du système est tout à fait différent ; seul les mois de juillet, août et septembre montrent une perte en sédiments, avec

un maximum en août qui atteint seulement 40 000 t. À partir de novembre, et en décembre et janvier, les exportations de matières observées à Diré excèdent d'environ 40 000 t mois⁻¹ les flux mesurés à la sortie du lac Débo.

Un léger excédent des sorties subsiste de février à juin. Ce gain de matières en suspension a déjà été évoqué dans le bilan annuel ; limité à la période novembre-juin, il correspond, en saison sèche, à l'observation de vents forts (harmattan) orientés dans la direction principale du fleuve à l'aval du lac Débo qui favorisent une érosion des berges et une reprise des dépôts de fond dans les biefs les moins profonds. C'est la période d'apports éoliens (sables dunaires) des brumes sèches et de poussières atmosphériques ; c'est aussi une période de blooms planctoniques (par exemple la transformation de silice dissoute en silice du test des diatomées). La position septentrionale du Delta aval plus proche des confins sahariens explique ce fonctionnement bien différencié de celui du Delta amont. La figure 12 illustre ces variations de flux des suspensions pour les deux parties du Delta et pour l'ensemble de la cuvette lacustre.

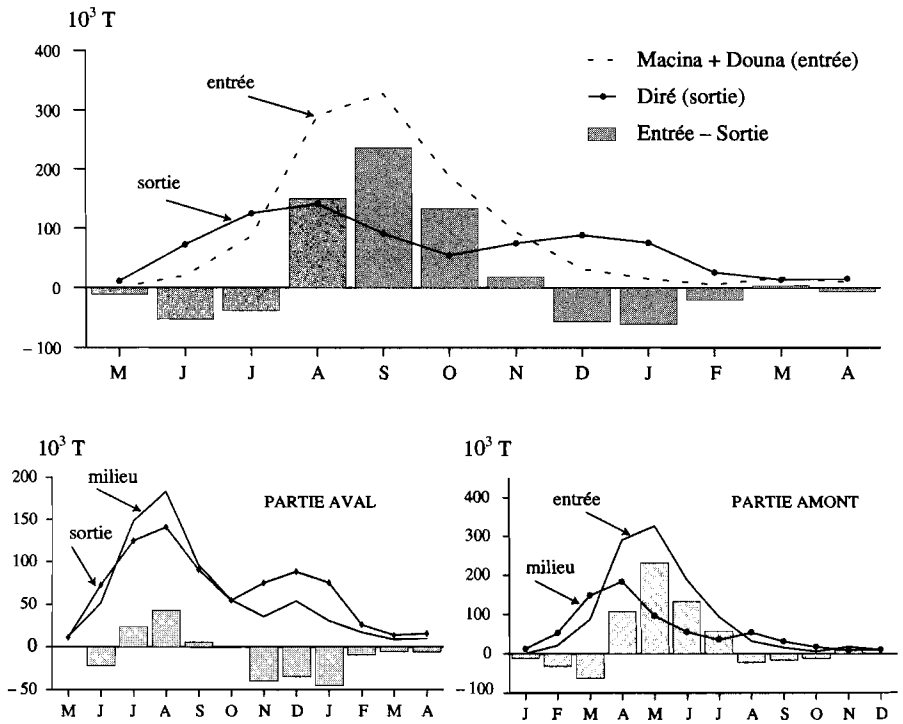


FIGURE 12

Variations mensuelles des transports particuliers du fleuve Niger en 1992-1993.
 Monthly balance of the suspended load fluxes of the Niger river in 1992-1993.

Les variations mensuelles des flux de matières dissoutes montrent un schéma beaucoup moins différencié entre les deux parties du Delta intérieur. Sur la partie amont, les pertes sont maximales en septembre, mois de mise en eau des plaines d'inondation de la cuvette lacustre, avec 240 000 t ; les pertes du mois d'octobre atteignent 55 000 t. En novembre, décembre et janvier, une vidange vers le fleuve d'une partie des volumes de l'inondation ramène une charge dissoute excédentaire par rapport aux entrées, qui ne dépasse pas au total 40 000 t.

Dans la partie aval, les pertes sont plus étalées dans le temps (d'août à décembre) avec un maximum en septembre limité à 40 000 t.

C. Bilan des éléments dissous

Les bilans correspondent à la période allant du 1^{er} juillet 1990 au 30 juin 1991 à Banankoro (Fig. 13).

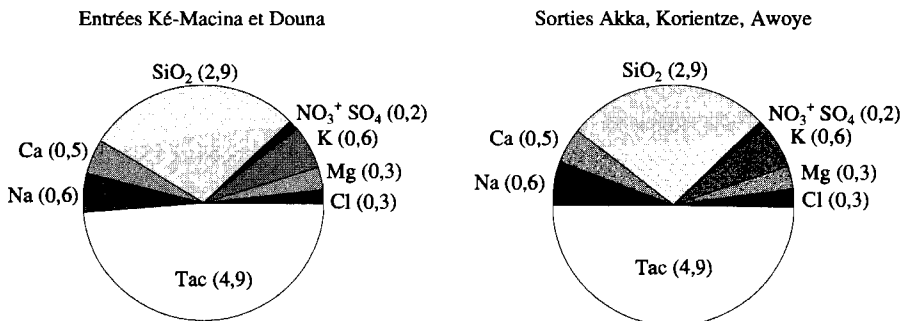


FIGURE 13.

Bilan de matières dissoutes (10³ tonnes an⁻¹).

Budget of dissolved matters (10³ tons year⁻¹).

Les premiers résultats acquis indiquent que les eaux du fleuve Niger et du Bani sont dans l'ensemble peu minéralisées, avec des conductivités moyennes de 50 à 80 $\mu\text{S cm}^{-1}$, augmentant régulièrement durant l'étiage et diminuant fortement dès les premières crues. Le pH est légèrement basique toute l'année, entre 7,1 et 8. En ce qui concerne les éléments dissous, la silice et les bicar-

bonates sont les espèces dominantes, leur somme dépassant toujours 75 % du poids total d'éléments dissous. Les bilans de matières dissoutes montrent qu'en début de crue (mai) les eaux à l'entrée du Delta sont peu minéralisées alors qu'elles ont été enrichies à la sortie pendant la saison sèche. Il y a ensuite dilution des eaux à l'aval et augmentation des débits amont. On constate par ailleurs un assez bon équilibre entre les apports au Delta et les sorties (Gourcy et Sondag, 1995).

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.

Durant un cycle hydrologique, les sels sont, dans les marais, probablement pris par la végétation et accumulés dans les sols des lacs et des mares temporaires. Une partie peut repartir avec les vents lorsque les lacs s'assèchent. Les sels suivent un cycle complexe qui est accentué par une régression constante de la hauteur de l'inondation.

CONCLUSION

Au stade actuel des mesures disponibles, il est difficile d'aller plus loin dans l'interprétation du fonctionnement de l'hydrosystème et en particulier de celui du Delta intérieur. Des mesures complémentaires sur plusieurs années permettront de vérifier la répétition des phénomènes observés. 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. Un suivi chimique annuel des pluies est nécessaire pour les corrections des apports atmosphériques, sans doute non négligeables à cause des forts vents de poussière régnant sur le milieu.

Le Delta intérieur du Niger ne correspond pas à un bassin sédimentaire ancien du type de celui du lac Tchad où l'épaisseur des dépôts traduit une longue histoire géologique. L'importance relativement faible des dépôts de matières, caractérisant ici les périodes de faible hydraulicité du Niger, doit être ramenée à la grande extension des zones d'inondation et à une distribution géographique des zones de dépôts qui a beaucoup évolué depuis le Quaternaire récent.

RÉFÉRENCES

- Brunet-Moret (Y.), Chaperon (P.), Lamagat (J.-P.) et Molinier (M.), 1986. *Monographie hydrologique du fleuve Niger* – tome I : Niger supérieur, 396 p. ; tome II : Cuvette lacustre et Niger moyen, 506 p., Coll. *Monog. Hydrol.* n° 8, Orstom, Paris.
- Fontes (J.-Ch.), 1976. Isotopes du milieu et cycles des eaux naturelles : quelques aspects. Thèse Doct. État Sciences, Univ. P. et M. Curie, Paris, 208 p.
- Fontes (J.-Ch.), Andrews (J.N.), Edmunds (W.M.), Guerre (A.), Travi (Y.), 1991. « Paleorecharge by the Niger River (Mali) Deduced From Ground-water Geochemistry ». *Water Resources Research*, 27 (2) : 199-214.
- Gac (J.Y.), 1980. « Géochimie du bassin du lac Tchad. Bilan de l'altération, de l'érosion et de la sédimentation ». *Travaux et documents Orstom*, 123 : 251 p.
- Gac (J.Y.) et Orange (D.), 1990. Cadre naturel du haut bassin-versant du fleuve Sénégal. Rapp. Orstom Dakar. Projet CEE/EQUESEN n° TS-2-0-198-F-EDB, 150 p.
- Gourcy (L.), 1994. Fonctionnement hydrogéochimique de la cuvette lacustre du fleuve Niger (Mali). Thèse Doct. Sciences, Univ. Paris XI, Orsay, 271 p.
- Gourcy (L.) et Sondag (F.), 1995. Premiers résultats sur la distribution et le bilan des éléments majeurs dissous dans la cuvette lacustre du fleuve Niger (Mali) (année 1990-1991). In *Grands Bassins Fluviaux* (J.-C. Olivry et J. Boulègue, Ed. Sci.), Actes du Colloque PEGI, 22-24 Novembre 1993. Coll. Colloques et Séminaires Orstom, p. 293-304.
- Olivry (J.-C.), Bricquet (J.-P.), Bamba (F.) et Diarra (M.), 1995a. « Le régime hydrologique du Niger supérieur et le déficit des deux dernières décennies ». In *Grands Bassins Fluviaux* (J.-C. Olivry et J. Boulègue Éd. Sci.), Actes du Colloque PEGI, 22-24 Novembre 1993. Coll. Colloques et Séminaires Orstom, p. 251-266.
- Olivry (J.-C.), Gourcy (L.) et Toure (M.), 1995b. « Premiers résultats sur la mesure des flux de matières dissoutes et particulaires dans les apports du Niger au Sahel ». In *Grands Bassins Fluviaux* (J.-C. Olivry et J. Boulègue Éd. Sci.), Actes du Colloque PEGI, 22-24 Novembre 1993. Coll. Colloques et Séminaires Orstom, p. 281-292.
- Orange (D.), 1990. Hydroclimatologie du Fouta Djalou et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique. Thèse, Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, 220 p.
- Roche (M.-A.), 1973. Traçage naturel salin et isotopique des eaux du système hydrologique du lac Tchad. Thèse de Doctorat, Univ. Paris VI, 398 p.