

COMPORTEMENT DU CARBONE ORGANIQUE DANS LES EAUX DU FLEUVE NIGER LORS DE LEUR TRAVERSEE DU DELTA INTERIEUR DU NIGER (AU MALI)

Didier ORANGE¹, Robert ARFI², Cécile PICOUET³,
Henri ETCHEBER⁴

1. IRD/IWMI, UR ECU, 57 Tran Hung Dao, Hanoi, Vietnam, orange@ird.fr

2. IRD, UR FLAG, Centre Ifremer, Sète

3. Institut Polytechnique de Lausanne, Suisse

4. CNRS, Université de Bordeaux

Résumé

Les eaux du fleuve Niger au Mali sont très peu minéralisées (moins de 50 mg l⁻¹an⁻¹) malgré la traversée de son delta intérieur, plaine d'inondation où 40 à 60 % de l'eau fluviale est perdue par évaporation. Une large part de la matière minérale dissoute y est consommée par une intense activité trophique, comme le montre les fluctuations de concentrations en carbone organique dissous et particulaire beaucoup plus importantes dans le delta que sur le bassin amont, où le carbone organique dissous et particulaire évolue respectivement entre 0,1-4 mg l⁻¹ et 0,1-2 mg l⁻¹. Dans le delta, les plus fortes concentrations fluviales (5-9 mg l⁻¹ pour le COD, 3-6 mg l⁻¹ pour le COP) sont observées à la montée des eaux (en août) lors du maximum de turbidité des eaux. Un deuxième pic de concentration est enregistré en octobre lors des hautes-eaux. Les teneurs en chlorophylle (entre 4 et 8 µg l⁻¹) et diatomées indiquent pour ce second pic une origine autochtone majeure du carbone organique dissous et particulaire, issu directement de la production primaire dans le fleuve, les mares et plaines inondées, du fait de l'inondation généralisée qui s'accompagne d'une chute de la vitesse du courant. L'exportation moyenne annuelle du carbone organique dissous et particulaire hors du delta intérieur du Niger reste cependant faible, de l'ordre de 1,7 mg l⁻¹an⁻¹ de COD et de 0,6 à 0,8 mg l⁻¹an⁻¹ de COP, ce qui correspond aux teneurs moyennes annuelles des eaux entrant dans le delta. Le carbone organique produit dans le delta est donc très rapidement consommé sur place par les échelons trophiques supérieurs et n'est que très peu évacué hors du delta.

Mots clés : carbone organique, chlorophylle, flux de matières, fleuve Niger, plaine d'inondation, Mali

Abstract

The Niger river waters in Mali are very diluted in mineral elements (between 35 and 50 mg l⁻¹ year⁻¹) in spite of the crossing of its inner delta, immense plain of flood where 40 to 60 % of its river water are lost by evaporation. A big part of the dissolved mineral matter is consumed there by an intense trophic activity, as shows it the fluctuations of organic carbon concentrations dissolved and particulate much more significant in the delta than on the basin upstream, where dissolved and particulate organic carbon evolves respectively between 0,1-4 mg l⁻¹ and 0,1-2 mg l⁻¹. In the delta,

the strongest concentrations (5-9 mg l⁻¹ for the DOC, 3-6 mg l⁻¹ for the POC) are observed with the rise of water (in August) at the time of the maximum water turbidity, the highest values being on the level of the ponds, the plains, the margins and the central lakes. A second peak of concentration is recorded in October during the high-water period. In fact, the chlorophyll contents (between 4 and 8 µg l⁻¹) and diatoms indicate for this second peak a major indigenous origin of dissolved and particulate organic carbon, directly resulting from the primary production in the river, the flooded ponds and plains, because of generalized flood which is accompanied by a fall current velocity. The annual export average of dissolved and particulate carbon organic out of the inner delta of the Niger River remains however weak, about 1,7 mg l⁻¹year⁻¹ of DOC and 0,6 to 0,8 mg l⁻¹year⁻¹ of POC, which corresponds to the annual average contents of water entering the delta. The organic carbon produced in the delta is thus very quickly consumed on the spot by the higher trophic levels and is only evacuated very little out of the delta.

Key-words : organic carbon, chlorophyll matter river transport, Niger River, flooding area, Mali

INTRODUCTION

La principale caractéristique des eaux de surface du bassin du fleuve Niger en Guinée et au Mali est leur très faible minéralisation comme pour la plupart des fleuves africains. Les conductivités moyennes annuelles se situent entre 35 et 50 µS cm⁻¹. La charge minérale totale dissoute moyenne annuelle augmente progressivement depuis l'amont (en Guinée) jusqu'à la sortie de la plaine d'inondation du delta intérieur du Niger (au Mali) : 35 mg l⁻¹an⁻¹ en Guinée, 44 mg l⁻¹an⁻¹ à l'entrée du delta et 48 mg l⁻¹an⁻¹ à la sortie (Gourcy, 1994 ; Bricquet *et al.*, 1997 ; Picouet, 1999). Cette faible évolution de la charge dissoute minérale n'est pas représentative des 40 à 60 % de perte en eau par évaporation que subit le fleuve Niger lors de la traversée du delta intérieur où il inonde entre 15 000 et 30 000 km² selon les années (Orange *et al.*, 2002). En fait, une large part de la matière minérale dissoute semble être stockée ou consommée dans le delta (Gourcy, 1996 ; Picouet *et al.*, 2002). Les résultats du suivi mensuel de la teneur en carbone organique dissous et particulaire dans les eaux fluviales au cours de deux cycles hydrologiques (de 1996 à 1997), accompagné de mesures de productivité planctonique au cours de trois campagnes de prélèvements entre 1997 et 2000 (Arfi, 2002) sont présentés ici pour préciser le fonctionnement biogéochimique du delta intérieur du fleuve Niger au Mali et caractériser son impact sur les flux de matières exportées par ce fleuve vers la boucle du Niger. Les méthodes d'échantillonnage et les protocoles d'analyse sont très largement décrits dans Picouet (1999) et Arfi (2002).

MILIEU

Le delta intérieur du Niger est compris entre les latitudes 12°10' N et 16°20' N, les longitudes 3°00' O et 6°00' O (fig. 1). Cette zone d'inondation est alimentée par deux cours d'eau, le Bani à Douna et le fleuve Niger, dit amont, à Ké-Macina (fig. 1). Elle est caractérisée par un chapelet de lacs centraux (d'ouest en est : les lacs Wallado, Débo et Korientzé) où tous les écoulements amont venant du sud convergent, et par un point de sortie unique au niveau de Diré sur le fleuve Niger. Cet ensemble est constitué

de plaines inondables, de mares, lacs et chenaux non pérennes, de dunes et plateaux, le tout réalisant une répartition spatiale complexe des eaux d'inondation.

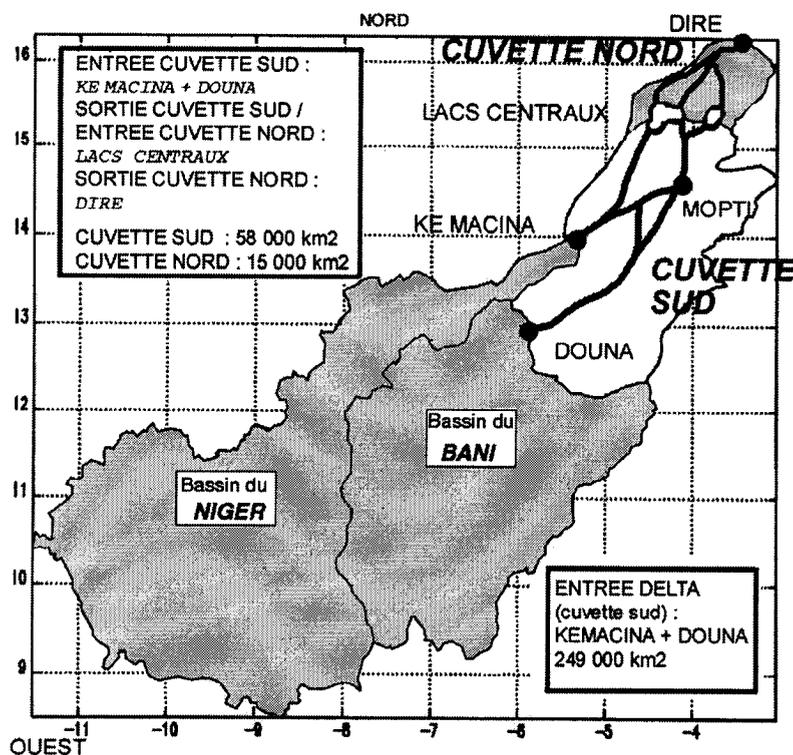


Figure 1. Le bassin versant du fleuve Niger et de son delta intérieur au Mali

RESULTATS

Aperçu sur la chimie des eaux de surface

La caractéristique principale des eaux du fleuve Niger amont et de ses deux principaux affluents, le Bani et le Sankarani, est leur faible minéralisation. Les conductivités à 20°C se situent autour de $39 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ pour le Niger à Banankoro et sont un peu plus élevées sur le Bani à Douna (de l'ordre de $50 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). La charge cationique moyenne des eaux de surface varie suivant les stations entre 320 et $450 \mu\text{eq}\cdot\text{l}^{-1}$. Ces valeurs sont très en-dessous de la valeur moyenne de $800 \mu\text{eq}\cdot\text{l}^{-1}$ des rivières non polluées du globe (Meybeck *et al.*, 1996). La moyenne annuelle de la charge totale dissoute inorganique (TDS), définie comme la somme des ions majeurs et de la silice dissoute (filtration à $0.2 \mu\text{m}$), est de $44 \pm 4 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ pour le Niger à Ké Macina (sur 6 années d'études et 114 analyses), de $46 \pm 6 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ pour le Bani à Douna (sur 6 années d'études et 112 analyses) et de $48 \pm 2 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ pour le Niger à Diré à la sortie du delta (sur 3 années d'études et 52 analyses). Ainsi les eaux de surface sortant du delta intérieur du Niger ne sont que très légèrement plus minéralisées que les eaux du bassin du Niger amont. Notons qu'il semble que ce soit au centre du delta, à la sortie du lac Débo que les eaux soient les plus concentrées : on a mesuré dans les eaux du bras central du fleuve Niger à Akka une moyenne annuelle de $49 \pm 2 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ pour le Niger à Akka (sur 4 années d'études et 69 analyses) (tableau 1, d'après Picouet, 1999).

La silice dissoute et les bicarbonates, représentent l'essentiel de la minéralisation des eaux (entre 75 et 80% de la charge dissoute totale). Ces proportions sont toutefois un peu plus faibles que sur les stations à l'entrée du delta (Ké-Macina et Douna). Les eaux du delta aux stations principales de Akka et de Diré ont des concentrations en cations et surtout en bicarbonates (en mg.l⁻¹) légèrement plus fortes qu'aux entrées, des concentrations pour les autres anions plus faibles, et des concentrations en silice du même ordre de grandeur. A Akka le rapport moyen silice/cations (en masse), de 1,5, est plus faible qu'à Ké-Macina (1,7) mais du même ordre de grandeur qu'à Douna (1,5). Ce rapport, qui n'est plus que de 1,3 à Diré, met en évidence un appauvrissement en silice dissoute au cours de la traversée du delta par rapport aux cations (Picouet, 1999).

Cette différence suggère qu'il se produit dans le delta des processus minéralogiques, tels que la précipitation de minéraux, ou des processus biologiques, tels que la consommation de silice par des diatomées. Enfin du fait que les balances ioniques ($BI = 200 * (\Sigma^+ - \Sigma^-) / (\Sigma^+ + \Sigma^-)$; avec, Σ^+ somme des cations et Σ^- somme des anions) soient inférieures à 5 %, on peut considérer que les ions non mesurés tels que les anions inorganiques ne sont pas des composants importants des eaux du fleuve Niger dans le delta. La composition des eaux est bien essentiellement minérale.

Tableau 1. Composition chimique moyenne des eaux du fleuve Niger à la sortie de son bassin amont (stations de Ké Macina et de Douna sur le Bani) et dans son delta intérieur (stations de Akka et de Diré, sur le bras central du fleuve), (d'après Picouet, 1999).

	Niger (amont)		Bani		Niger (Delta)			
	Ké-Macina	+/- σ	Douna	+/- σ	Akka	+/- σ	Diré	+/- σ
Nombre années	6		6		4		3	
Nombre analyses	114		112		69		52	
Débit (m ³ .s ⁻¹)	907 +/- 287		224 +/- 120		+/-		+/-	
pH	7.1 +/- 0.2		7.0 +/- 0.2		7.0 +/- 0.4		6.9 +/- 0.02	
Cond 20° (μS.cm ⁻¹)	39.0 +/- 3.9		44.8 +/- 9.2		43.3 +/- 3.3		43.5 +/- 0.7	
Ca (mg.l ⁻¹)	2.4 +/- 0.4		2.7 +/- 0.3		2.7 +/- 0.5		2.6 +/- 0.6	
Mg (mg.l ⁻¹)	1.1 +/- 0.3		1.2 +/- 0.2		1.3 +/- 0.3		1.3 +/- 0.1	
K (mg.l ⁻¹)	1.5 +/- 1.3		2.1 +/- 0.2		2.0 +/- 0.2		2.2 +/- 0.2	
Na (mg.l ⁻¹)	3.0 +/- 0.4		2.6 +/- 0.6		3.2 +/- 0.4		3.3 +/- 0.3	
Tac (mg.l ⁻¹)	22.1 +/- 4.6		23.5 +/- 2.1		25.2 +/- 2.1		24.4 +/- 2.2	
Cl (mg.l ⁻¹)	0.7 +/- 1.0		0.7 +/- 0.3		0.6 +/- 0.2		0.9 +/- 0.4	
NO ₃ * (mg.l ⁻¹)	0.2 +/- 0.2		0.6 +/- 0.1		0.2 +/-		0.03 +/-	
SO ₄ * (mg.l ⁻¹)	0.3 +/- 0.1		0.4 +/- 0.1		0.2 +/- 0.2		0.5 +/-	
SiO ₂ (mg.l ⁻¹)	13.3 +/- 1.7		12.6 +/- 3.1		13.6 +/- 1.8		12.3 +/- 1.5	
TDS (mg.l⁻¹)	44.4 +/- 3.5		46.1 +/- 5.9		48.9 +/- 1.5		48.0 +/- 1.9	
Σ+ μeq.l ⁻¹	373 +/- 21		409 +/- 44		431 +/- 34		433 +/- 26	
Σ- μeq.l ⁻¹	390 +/- 25		423 +/- 40		433 +/- 32		440 +/- 39	
BI %	-5		-3		-1		-1	

* de nombreuses valeurs sont inférieures à la limite de détection

Evolution du carbone organique dissous dans les eaux de surface du fleuve Niger

Les teneurs en carbone organique dissoute (COD) des eaux de surface du bassin du fleuve Niger au Mali sont relativement basses. Sur nos deux années de suivies, les teneurs évoluent autour d'un quartile 25% de 1,5 mg l⁻¹ ; elles dépassent rarement 2,5 mg.l⁻¹ et la valeur minimale enregistrée est de 0,8 mg l⁻¹ (tableau 2). Ces valeurs sont faibles par rapport à la teneur mondiale estimée à 4,2 mg l⁻¹ (Meybeck *et al.*,1996). On note l'existence de valeurs maximales exceptionnelles, telles celles enregistrées à Koulikoro le 29 juillet 1997 avec 15 mg l⁻¹.

Tableau 2. Concentration en carbone organique dissous (COD en mg l⁻¹) des eaux du fleuve Niger dans son bassin amont (stations de Banankoro, Koulikoro, Ké Macina et de Douna sur le Bani), dans son delta intérieur (stations de Sensé et Akka) et à la sortie du delta (station de Diré)

Date	Banankoro	Koulikoro	Ké-Macina	Douna	Sensé	Akka	Diré
18.06.96	2,5		1,6	2,3			
01.07.96			1	1,2	0,85		
12.08.96		1,6	1,94	1,97	2,3		2,42
28.10.96	1,81	1,6	1,2	1,47		6,72	1,12
02.12.96	0,92	1,22	0,84	1,4			
19.02.97		1,7	1,72	2,73	2,8	7,27	0,95
17.04.97	1,7	1,25	1,46	1,62	1,76		2,35
29.07.97	7,64	15	2	1,75	1,84	1,66	2,15
11.10.97		2,48		1,2			
07.11.97			1		1,03		
Moyenne	2,9	3,5	1,4	1,7	1,8	5,2	1,8
<i>std</i>	2,70	5,07	0,43	0,52	0,74	3,09	0,71
Quartile 25%	1,7	1,4	1,0	1,4	1,2	4,2	1,1
max	7,64	15	2,00	2,73	2,80	7,27	2,42
min	0,92	1,22	0,84	1,20	0,85	1,66	0,95

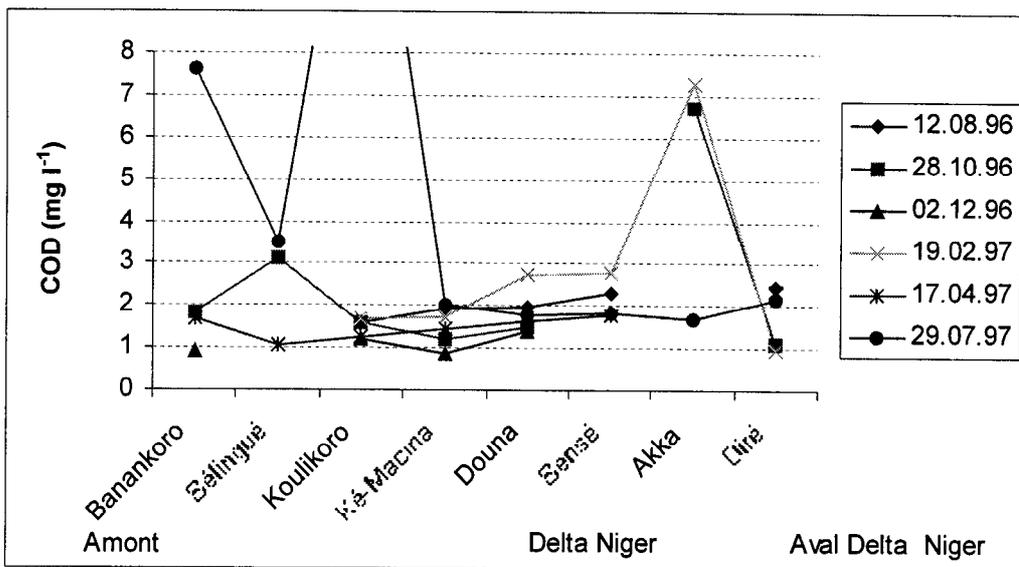


Figure 2. Evolution des teneurs en carbone organique dissous (COD) des eaux du fleuve Niger entre son bassin amont (stations de Banankoro à Koulikoro) et la sortie de son delta intérieur (station de Diré) en fonction des campagnes de prélèvements (entre le 12 août 1996 et le 29 juillet 1997).

La station de Akka, située à la sortie du Lac Débo au centre du delta intérieur), est la seule station qui se démarquent des autres. La concentration moyenne à Akka est de $5,2 \text{ mg.l}^{-1}$ (avec des valeurs comprises entre $1,7$ et 73 mg.l^{-1}) alors qu'à la station de Diré située à son aval montre une concentration en COD similaire à celle de la station de Sensé. En effet, on ne voit pas de différence notable entre les stations de l'amont à l'aval à l'exception de la station de Akka (figure 2).

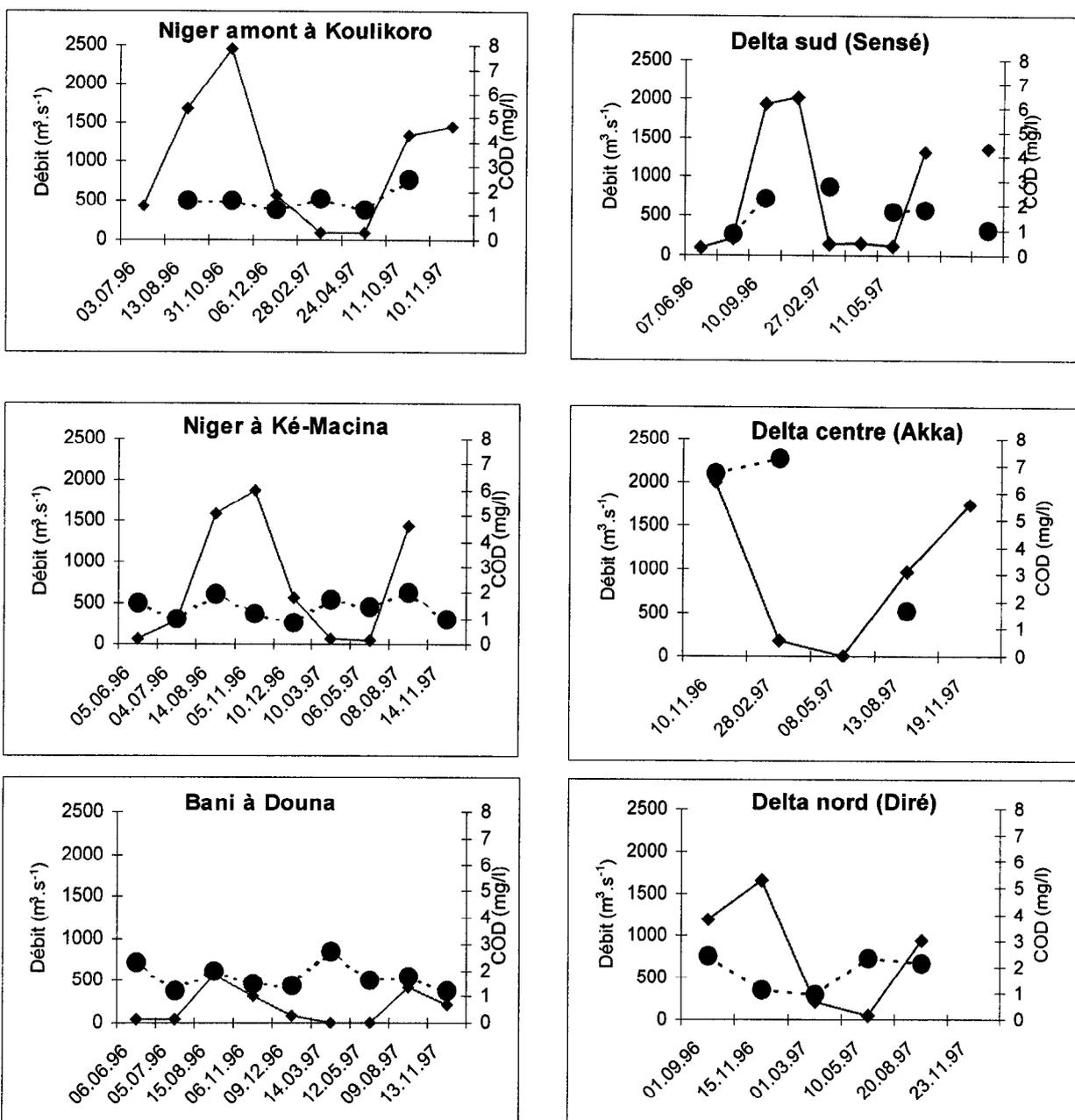


Figure 3. Evolution des teneurs en carbone organique dissous (COD, figuré en point) et du débits (figuré en ligne continue) des eaux du fleuve Niger entre son bassin amont (stations de Koulikoro) et la sortie de son delta intérieur (station de Diré).

La figure 3 montre que les teneurs en COD ne sont pas dépendantes du débit du cours d'eau.

Evolution du carbone organique particulaire dans les eaux de surface du fleuve Niger

Les teneurs relatives en COP (>0.45µm) mesurées lors des campagnes de 1996 à 1997 varient /dans le bassin amont du fleuve Niger, de 1,3 à 20,4 % de la quantité de matières en suspension, ce qui correspond à des teneurs de 0,1 à 3 mg l⁻¹ (tableau 3) ;

- dans le delta intérieur, de 1,9 à 17,4 % de la quantité de matières en suspension, soient des teneurs de 0,3 à 17,8 mg l⁻¹ (tableau 3).

Tableau 3. Teneurs en carbone organique particulaire (COP en % des matières en suspension et en mg l⁻¹) et teneurs en matières en suspensions (TS en mg l⁻¹) sur l'ensemble des stations du bassin amont du fleuve Niger et de son delta intérieur (d'après Picouet, 1999).

	CV%	Médiane	Min.	-	Max.	Quartile 25%	-	Quartile 75%
Niger amont (38 valeurs)								
COP (%)	71%	4.9	1.3	-	20.4	3.9	-	7.1
TS * (mg.l ⁻¹)	159%	13	2.3	-	209	7.2	-	16
COP* (mg.l ⁻¹)	77%	0.62	0.10	-	3.01	0.46	-	1.4
Basses eaux (10 valeurs)								
%COP	51%	11.2	3.9	-	20.4	7.2	-	17
TS * (mg.l ⁻¹)	58%	7.4	2.3	-	16	5.5	-	9.07
COP* (mg.l ⁻¹)	65%	0,62	0.23	-	1.86	0.49	-	1.3
Hautes eaux (24 valeurs)								
%COP	64%	4.6	1.3	-	15.5	2.8	-	5.9
TS * (mg.l ⁻¹)	143%	13.75	3.8	-	209.5	8.125	-	38.62
COP* (mg.l ⁻¹)	78%	0.64	0.10	-	3.01	0.46	-	1.45
Chenal principal (18 valeurs)								
COP (%)	117%	3.2	1.7	-	17.4	2.3	-	4.75
TS * (mg.l ⁻¹)	113%	31.3	5.2	-	123	11.1	-	69
COP* (mg.l ⁻¹)	48%	0.92	0.3	-	17.8	0.411	-	1.38
Basses eaux (7 valeurs)								
%COP	100%	3.4	1.9	-	17.4	3	-	4.5
TS * (mg.l ⁻¹)	143%	34.5	15.3	-	102.3	25.65	-	55.25
COP* (mg.l ⁻¹)	55%	1.04	0.68	-	17.8	0.85	-	1.24875
Hautes eaux (11 valeurs)								
%COP	218%	2.7	1.7	-	6.3	2.2	-	4.4
TS * (mg.l ⁻¹)	103%	22.8	5.2	-	123	8.225	-	70.85
COP* (mg.l ⁻¹)	137%	0.63	0.3	-	2.09	0.339	-	1.545
Marges et chenaux secondaires (Hautes eaux, 59 valeurs)								
COP (%)	140%	4.4	1.3	-	16.9	2.5	-	6.6
TS * (mg.l ⁻¹)	75%	12.06	2.8	-	149	7.67	-	20.8
COP* (mg.l ⁻¹)	114%	0.5	0.24	-	4.03	0.43	-	0.72

*filtration à 0.45µm.

La moitié des valeurs est inférieure à 5 % et seulement 25 % sont supérieures à 7%. Les valeurs les plus fortes sont rencontrées en décrue et en basses eaux. Les concentrations en mg.l⁻¹ sont le plus souvent comprises entre 0,1 et 1,85 (90% des valeurs). Sur l'ensemble des points et des stations, il n'y a pas de corrélation significative entre le Débit et le COP, mais la quantité relative de COP tend à diminuer avec le débit (Picouet, 1999). Ces premières remarques soulignent la différence entre la période de hautes eaux et l'étiage et, par conséquent, la relation qui existe entre le débit du fleuve et le COP transporté. La relation inverse classique (Wasson *et al.*, 1991 ; Guyot *et al.*,

1993 ; Orange, 2002) entre les teneurs en COP exprimées en % de matière sèche et la charge en matières en suspensions TS est vérifiée (figure 4) : entre 0 et 50 mg l⁻¹ de TS, les teneurs relatives en COP dépassent toujours 1% et peuvent atteindre jusqu'à 20% (les particules minérales sont peu abondantes et la contribution relative des particules organiques est d'autant plus forte) ; pour les concentrations en TS supérieures à 50 mg l⁻¹ ces valeurs oscillent entre 1,3 et 3% (on a alors une contribution importante des sols du bassin versant à la part des suspensions transportées par le fleuve).

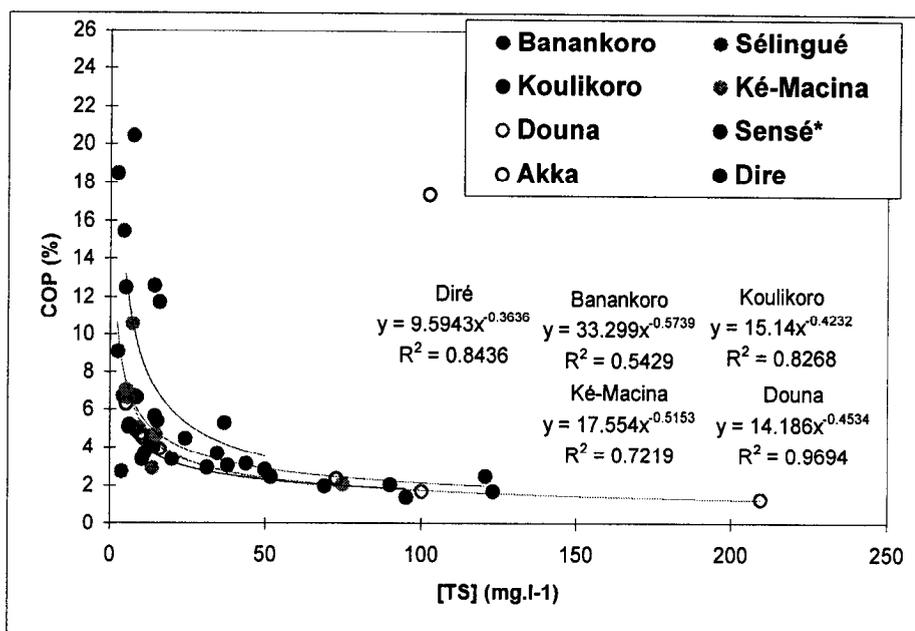


Figure 4. Relation entre les teneurs relative en COP et la quantité de matières en suspension (TS) dans le bassin du fleuve Niger.

De telles variations suggèrent l'existence de deux réservoirs de matière organique d'origine différente selon les saisons, autochtone phytoplanktonique et allochtone pédologique. Il existe deux mécanismes qui agissent en opposition. D'une part, l'augmentation des particules en suspensions est générée par l'arrivée de l'onde de crue qui entraîne ainsi un lessivage des roches et de l'horizon humique des sols du bassin versant. D'autre part, ce sont les particules minérales qui sont majoritairement arrachées au bassin versant amont, ce qui a pour conséquence de "diluer" la matière organique par rapport à la matière minérale. C'est l'arrivée de cette matière minérale provenant du bassin amont et transportée par le fleuve qui conduit à une dilution des particules organiques autochtones.

Lors des campagnes de 1996 à 1997, des prélèvements ont été réalisés au niveau du chenal principal du fleuve Niger dans son delta intérieur (sur les 2 stations de Akka et Diré mais aussi sur la station de Sensé à l'aval de Mopti) ainsi que sur des stations plus ponctuelles dans des mares, lacs centraux, défluent... Les teneurs relatives en COP relevées dans le chenal principal varient de 1,7 à 17,4 %, mais 75% des valeurs sont inférieures à 4,75 %. Les teneurs relatives les plus importantes à l'aval du lac Débo se rencontrent au début de la décrue (novembre)(mise à part celle de 17,4% qui correspond

à un échantillon du mois de mai). Pendant cette période, les valeurs sont légèrement plus importantes au niveau des marges et des lacs centraux, les valeurs les plus élevées (>10%) se rencontrant au niveau des mares (e.g. Batamani, Komina) ou des plaines inondées. Les fortes valeurs relatives de COP correspondent à des teneurs en éléments solides en suspensions (TS) très faibles. On retrouve la relation, déjà rencontrée sur le bassin amont, entre les teneurs en COP exprimées en % de matière sèche et la charge en MES (figure 4). Comme les concentrations relatives de COP inférieures à 2% sont observées généralement en août (montée de la crue et phase de stockage, figure 5), elles correspondent sans doute à des apports en COP d'origine allochtone dominante provenant des sols du bassin amont. Inversement, les teneurs relatives de COP importantes rencontrées en hautes eaux alors que les valeurs de TS sont très faibles suggèrent que le COP d'origine autochtone est dominant pendant cette période. En général, les cycles de blooms phytoplanctoniques sont à la base des fortes variations de teneurs en COP observées dans ces situations. En effet, les faibles vitesses d'écoulement rencontrées dans les plaines inondées par rapport au fleuve en hautes eaux accentuent les dépôts de matières minérales et y permettent, *a priori*, un développement planctonique important.

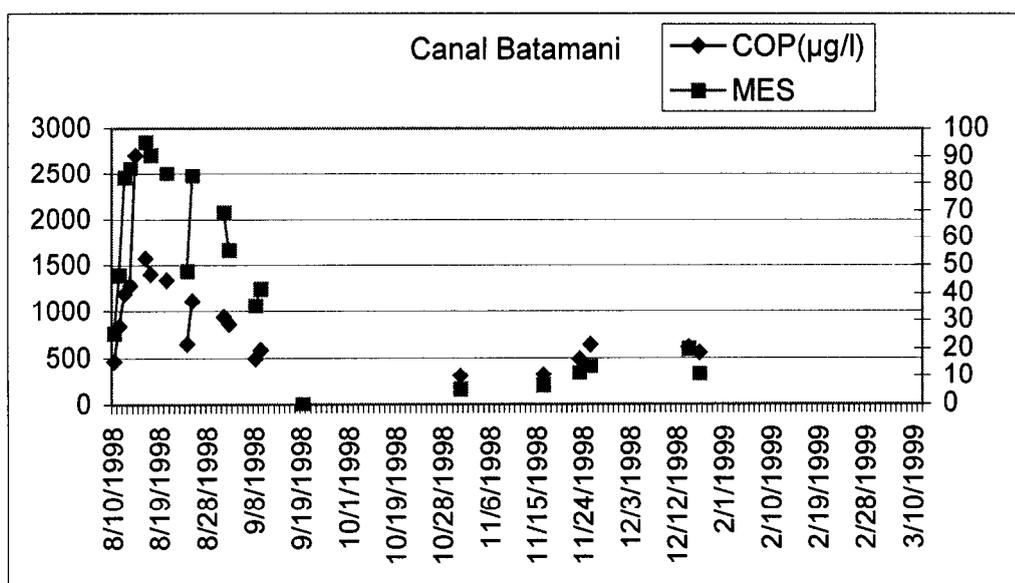


Figure 5. Evolution de la teneur en COP et des MES (en mg l⁻¹) dans un chenal d'alimentation d'une plaine d'inondation du delta intérieur du fleuve Niger.

Pourtant, une étude récente démontre que le delta intérieur du Niger est un système très peu producteur de biomasse phytoplanctonique (Arfi, 2002). Les facteurs limitants la croissance du phytoplancton sont différents suivant qu'on se situe en étiage ou en hautes eaux : en basses-eaux, les eaux sont riches en nutriments mais les taux de MES sont trop importants pour permettre le développement du phytoplancton ; en hautes-eaux, les teneurs en suspensions sont faibles mais il n'y a pas assez de nutriments pour permettre des blooms algales. En revanche les macrophytes enracinées présentes sur le delta tirent la majeure partie de leurs nutriments des sédiments plutôt que de la colonne d'eau (Carigna & Halff, 1980 ; cité dans Ryding & Rast, 1994 ; Testard, 1995, Arfi, 2002 ; Diarra *et al.*, 2002). Leur développement important dans le delta intérieur

du Niger peut participer au flux de matière, principalement sous forme de matière organique détritique, lors de leur phase de décomposition (Testard, 1995) et pourrait expliquer les fortes concentrations observées en novembre.

Les fortes teneurs en COP observées sur les deux stations principales du delta lors du début de la décrue (novembre) sont sans doute liées aux apports de débris végétaux apportés par la vidange de plaines d'inondations, mares, lacs.... Cela souligne l'importance des macrophytes présentes sur de grandes superficies du delta, qui peuvent en partie expliquer l'augmentation des teneurs en MES lors de la décrue aux stations aval du lac Débo (Arfi, 2002 ; Orange *et al.*, 2002).

DISCUSSION

Rôle du delta dans l'évolution du COD et COP

La concentration moyenne annuelle est la même entre l'amont et l'aval du delta (de l'ordre de $1,7 \text{ mg l}^{-1}\text{an}^{-1}$, ce qui est très faible par rapport à la moyenne mondiale estimée à $4,2 \text{ mg l}^{-1}\text{an}^{-1}$), celle-ci est supérieure dans le delta, entre 2 et $5 \text{ mg l}^{-1}\text{an}^{-1}$ (les valeurs les plus élevées se trouvant, dans l'ordre, au niveau des mares, des plaines, des marges et des lacs centraux). Les plus fortes concentrations sont observées lors de la montée des eaux et en hautes eaux. Les fortes valeurs rencontrées en hautes eaux (de novembre à décembre) suggèrent qu'il s'agit de COD autochtone issu du phytoplancton et des dégradations bactériennes locales. Sur le bassin amont, on retrouve la relation logarithmique classique entre le pourcentage de carbone organique particulaire dans les matières en suspension et la charge particulaire totale des eaux, selon laquelle lorsque les matières en suspension dans les eaux sont peu abondantes, la contribution relative des particules organiques est d'autant plus forte, suggérant en fait une dilution des matières organiques par un matériel minéral. La concentration des eaux de surface en COP varie peu entre 0,1 et $1,85 \text{ mg l}^{-1}$, la moyenne annuelle étant de l'ordre de $0,6 \text{ mg l}^{-1}\text{an}^{-1}$ pour une moyenne annuelle de matières en suspension évoluant de 20 à $40 \text{ mg l}^{-1}\text{an}^{-1}$, respectivement de l'amont du bassin vers l'entrée du delta. Mais le carbone organique particulaire suit un comportement plus complexe dans le delta où la plaine d'inondation joue le double rôle de piège à sédiments (la teneur moyenne annuelle en suspension passe de 40 mg/l à Mopti à 32 mg/l à Akka au niveau des lacs centraux) et de producteur de matières organiques.

Le suivi de la teneur en chlorophylle (entre 4 et $8 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$) montre une corrélation positive hautement significative avec le COP ($R^2=0,79$) (figure 6). Les teneurs en diatomées très fortes en août au début de la montée des eaux diminuent très rapidement lors de la montée des eaux car les eaux sont trop turbides. On enregistre un bloom planctonique fin septembre au moment de l'inondation généralisée (figure 7), bien corrélée avec une augmentation de chlorophylle, d'où le second pic de concentration en COP dans les eaux du Niger.

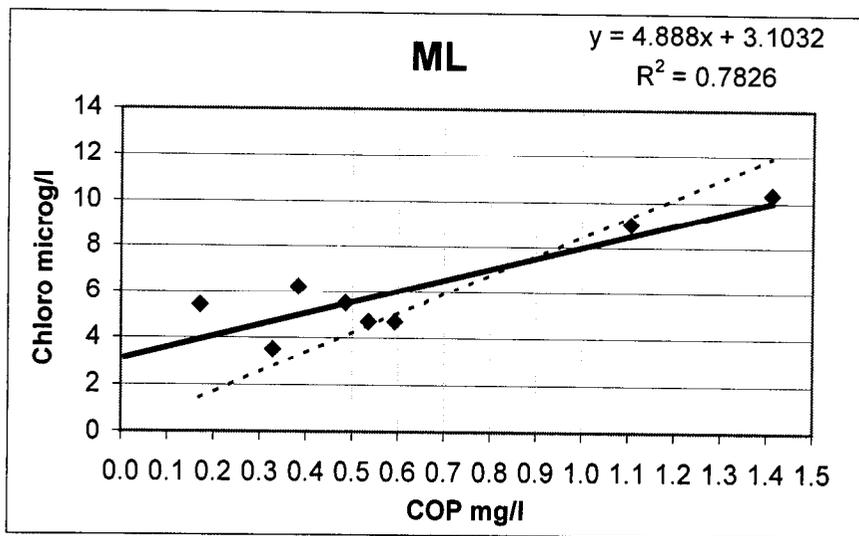


Figure 6. Evolution de la teneur en chlorophylle en fonction de la teneur en COP (en mg l^{-1}) dans une plaine d'inondation du delta intérieur du fleuve Niger.

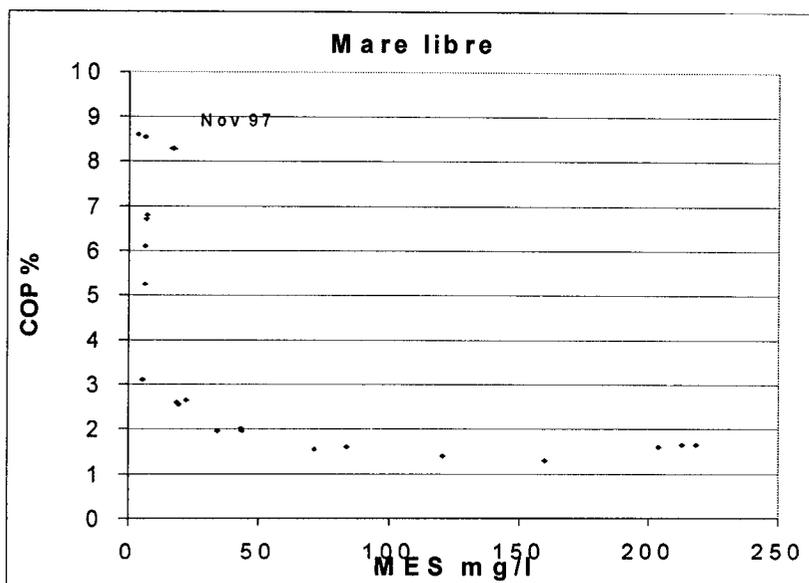


Figure 7. Evolution de la teneur en pourcentage de COP dans les MES en fonction des MES (en mg l^{-1}) dans une plaine d'inondation du delta intérieur du fleuve Niger.

Le premier pic de début de montée des eaux est certainement caractérisé par une matière organique allochtone d'origine plus ou moins lointaine (de la berge aux versants éloignés du bassin amont) provenant du lessivage des sols par les eaux de ruissellement des premières pluies. Le deuxième pic de concentration (en novembre) est caractéristique d'un carbone organique autochtone issu directement de la production primaire dans les mares et plaines inondées où les faibles vitesses d'écoulement rencontrées dans les plaines inondées à partir de novembre du fait de l'inondation généralisée en hautes eaux accentuent les dépôts de matières minérales et y permettent un développement planctonique important, d'où les fortes concentrations de novembre.

Par contre, en basses-eaux, les très fortes valeurs de COP liées à des pourcentages de COP importants dans les suspensions et à des teneurs en MES trop

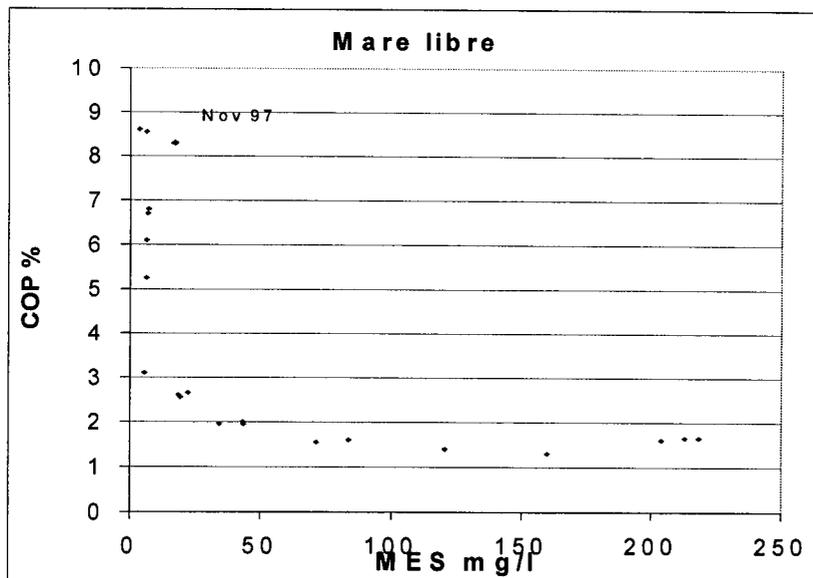


Figure 7.
Evolution de la teneur en pourcentage de COP dans les MES en fonction des MES (en mg l⁻¹) dans une plaine d'inondation du delta intérieur du fleuve Niger.

Le premier pic de début de montée des eaux est certainement caractérisé par une matière organique allochtone d'origine plus ou moins lointaine (de la berge aux versants éloignés du bassin amont) provenant du lessivage des sols par les eaux de ruissellement des premières pluies. Le deuxième pic de concentration (en novembre) est caractéristique d'un carbone organique autochtone issu directement de la production primaire dans les mares et plaines inondées où les faibles vitesses d'écoulement rencontrées dans les plaines inondées à partir de novembre du fait de l'inondation généralisée en hautes eaux accentuent les dépôts de matières minérales et y permettent un développement planctonique important, d'où les fortes concentrations de novembre.

Par contre, en basses-eaux, les très fortes valeurs de COP liées à des pourcentages de COP importants dans les suspensions et à des teneurs en MES trop importantes pour permettre le développement du phytoplancton, semblent indiquer qu'il s'agit cette fois d'une matière organique provenant uniquement d'une re-mobilisation locale du matériel macrophytique en phase de décomposition.

CONCLUSION

Pour conclure, nous remarquerons qu'étant donné les faibles volumes d'eau concernés par les basses eaux, l'exportation moyenne annuelle de ce COP reste faible, de l'ordre de 0,8 mg/l. Ainsi la forte productivité de carbone organique réalisée dans le delta est consommée sur place par les échelons trophiques supérieures et n'est que très peu évacuée hors du delta. A la sortie du delta, les eaux du fleuve Niger restent des eaux fluviales typiques des autres fleuves ouest africains.

BIBLIOGRAPHIE

- ARFI, R., 2002. Contrôle environnemental de productivité planctonique du delta intérieur du Niger. *In Orange et al. : Gestion intégrée des ressources naturelles en zones inondables tropicales, Colloques et séminaires*, Ed. IRD, Paris : 279-302.
- BRICQUET, J.-P., MAHE, G., BAMBA, F., DIARRA, M., MAHIEUX, A., DES TUREAUX, T.H., ORANGE, D., PICOUET, C., OLIVRY, J.-C., 1997. Erosion et transport particulaire par le Niger : du bassin supérieur à l'exutoire du delta intérieur (bilan de cinq années d'observation). *IAHS publ.*, 246 : 335-345.
- DIARRA, S., ORANGE, D., BONTE, P., 2002. Fonctionnement hydro-sédimentologique du lac Débo : le rôle du bourgou. *In Orange et al. : Gestion intégrée des ressources naturelles en zones inondables tropicales, Colloques et séminaires*, Ed. IRD, Paris : 315-328.
- CARIGNAN, R., KALFF, J., 1980. Phosphorus sources for aquatic weeds: water or sediments? *Science*, 207 : 987-989.
- GOURCY, L., 1994. Fonctionnement hydrogéochimique de la cuvette lacustre du fleuve Niger (Mali). *Thèse Sciences*, Univ. Paris-XI : 271 p.
- GOURCY, L., 1996. Le delta central du fleuve Niger agit-il comme un piège à éléments dissous et particulaires? *Sci. Géol. Bull.*, 49(1-4), Strasbourg : 47-70.
- MEYBECK, M., FRIEDRICH, G., THOMAS, R., CHAPMAN, D., 1996. Rivers. *In : Water quality assessments, a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring*. UNESCO/WHO, UNEP, Ed. D. Chapman, 2nd Ed. : 243-318.
- ORANGE, D., 1992. Hydroclimatologie du Fouta Djallon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique (Afrique de l'Ouest). *Thèse Sciences*, Univ. Strasbourg, *Mém. Sc. Géol.*, n°93, 198 p.
- ORANGE, D., MAHE, G., DEMBELE, L., DIAKITE, C.H., KUPER, M., OLIVRY, J.-C., 2002. Hydrologie, agro-écologie et superficies d'inondation dans le delta intérieur du Niger. *In Orange et al. : Gestion intégrée des ressources naturelles en zones inondables tropicales, Colloques et séminaires*, Ed. IRD, Paris : 209-230.
- ORANGE, D., ARFI, R., BENECH, V., KUPER, M., MARIEU, B., SIDIBE, I., 2002b. Hydrologie, agro-écologie et superficies d'inondation dans le delta intérieur du Niger. *In Orange et al. : Gestion intégrée des ressources naturelles en zones inondables tropicales, Colloques et séminaires*, Ed. IRD, Paris : 209-230.
- PICOUET, C., 1999. Géodynamique d'un hydrosystème tropical peu anthropisé : le bassin supérieur du Niger et son delta intérieur. *Thèse Sciences*, Univ. Montpellier: 454 p.
- PICOUET, C., ORANGE, D., MAHE, G., OLIVRY, J.-C., 2002. Rôle du delta intérieur du fleuve Niger dans la régulation des bilans de l'eau et de sédiments. *In Orange et al. : Gestion intégrée des ressources naturelles en zones inondables tropicales, Colloques et séminaires*, Ed. IRD, Paris : 245-258.
- RYDING, S.O., RAST, W., 1994. Le contrôle de l'eutrophisation des lacs et des réservoirs. *Sciences de l'Environnement*, 9, Ed. Masson & UNESCO, 294 p.
- TESTARD, P., 1995. Rôle des macrophytes littoraux dans le fonctionnement des écosystèmes lacustres. *In : Limnologie générale*, Coll. *Ecologie*, 25, Ed. Masson, Paris : 296-326.
- VEYSSY, E., 1998. Transferts de carbone organique, d'azote et de phosphore des bassins versants aux estuaires de la Gironde et de l'Adour (Sud-Ouest de la France). *Thèse Sciences*, Univ. Bordeaux I, 281 p.
- WASSON, J.-G., GUYOT, J.-L., SANEJOUAND, H., 1991. Premières données concernant le carbone organique transporté par le Rio Desaguadero (Altiplano bolivien). *Revue des Sc. de l'Eau*, 4(3) : 363-379.

**RESEAU
EROSION**



Référence bibliographique Bulletin du RESEAU EROSION

Pour citer cet article / How to cite this article

Orange, D.; Arfi, R.; Picouet, C.; Etcheber, H. - Comportement du carbone organique dans les eaux du fleuve Niger lors de leur traversée du delta intérieur du Niger (au Mali), pp. 432-445, Bulletin du RESEAU EROSION n° 22, 2004.

Contact Bulletin du RESEAU EROSION : beep@ird.fr