

PREMIERS RESULTATS SUR LA DISTRIBUTION ET LE BILAN DES ELEMENTS MAJEURS DISSOUS DANS LA CUVETTE LACUSTRE DU FLEUVE NIGER (MALI) (ANNEE 1990-1991).

L. GOURCY & F. SONDAG

RESUME

Cette étude s'intègre dans le programme "Environnement et Qualité des Apports du Niger au Sahel (EQUANIS) visant à estimer les apports du Niger au delta central, à y modéliser le bilan hydrique et à mettre en place une surveillance de la qualité des eaux dans la cuvette lacustre. Onze stations d'observation et de prélèvement ont été mises en place en juillet 90, à proximité d'échelles limnimétriques nationales relevées quotidiennement, tant sur le Niger que sur le Bani, son principal affluent. La fréquence d'échantillonnage actuelle est hebdomadaire.

Les premiers résultats acquis indiquent que les eaux des deux fleuves sont dans l'ensemble peu minéralisées, avec des conductivités moyennes de 50 à 80 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 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 bicarbonates 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. Par contre, sur les stations à l'intérieur de la cuvette, un déséquilibre apparaît qui pourrait être lié, tout au moins en partie, à des problèmes de mélange.

ABSTRACT

This study is part of the "EQUANIS" program which the objectives are: i) estimating inputs of the Niger to the central delta, ii) computing the hydrological balance, iii) monitoring the quality of waters in the central lacustrine basin. Eleven sampling locations were selected near gauging stations, both on the Niger and his main tributary, the Bani. Those sites were sampled weekly since July 1990.

The preliminary results of the first year study 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 TDS. 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. Rather good mass balance is found between inputs and outputs through the delta. But a disequilibrium appears at the sampling sites within the basin which could be partially linked to a bad mixing between the Niger and Bani waters.

1 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 du calcul des pertes en eau et de l'évolution des concentrations de la matière dissoute dans le but d'établir une relation 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.

2 SITE D'ETUDE ET METHODOLOGIE

2.1 La cuvette lacustre du fleuve Niger

Le Niger, troisième fleuve Africain, traverse le Mali de part en part et s'étale, au centre du pays, sur quelques milliers de km² de terres inondées.

Le fleuve prend naissance sur les plateaux Guinéens humides et reçoit en aval de Mopti le fleuve Bani provenant de régions moins arrosées de Côte-d'Ivoire. La station hydrométrique (Fig. 1) de Koulikoro a été installée en 1907 et permet le suivi des crues depuis cette période. Les modules interannuels pour la période 1952-1953 à 1990-1991 sont à Ke-Macina de 1202 m³ s⁻¹, à Sofara (Bani) de 335 m³ s⁻¹, à Kara (Diaka) de 378 m³ s⁻¹, à Nantaka (jonction des deux fleuves) de 992 m³ s⁻¹ et à la sortie de la cuvette à Dire de 971 m³ s⁻¹. L'hydrogramme à crue unique est de type tropical soudanais (Brunet-Moret et al, 1986).

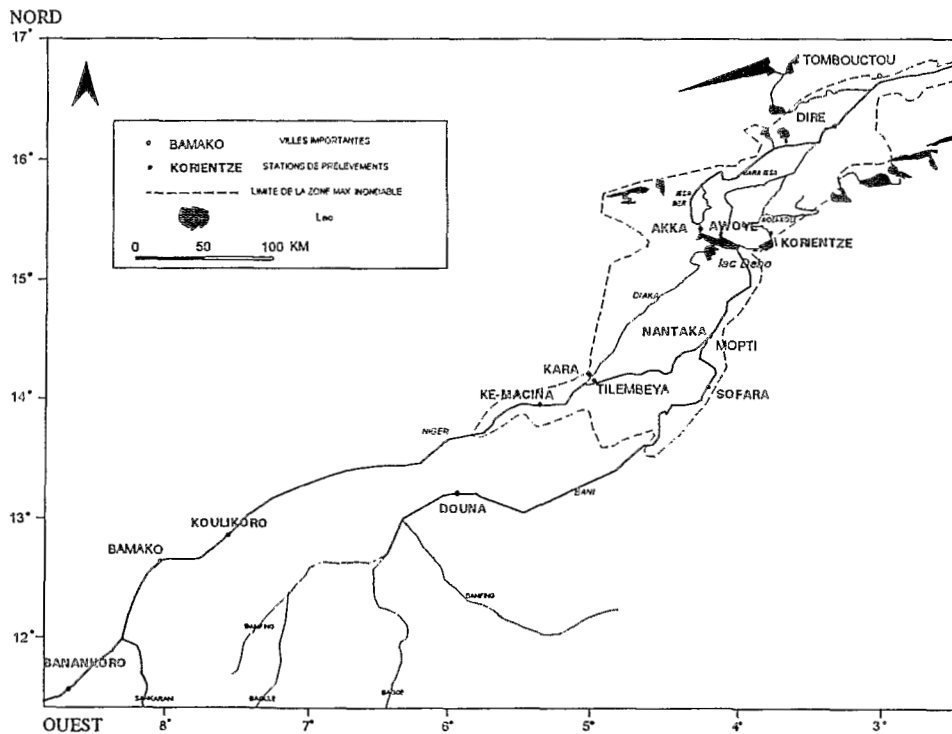


Figure 1

Carte de positionnement des stations de prélèvement

Le fleuve qui a une pente hydraulique de 7 cm km⁻¹ en amont de Ke-Macina, voit soudain sa pente tomber à 4 cm km⁻¹. La pente en aval du lac Debo ne dépasse pas 0.7 cm km⁻¹. Ceci provoque un ralentissement qui, lors de la crue annuelle entraîne un dépôt de charge et le débordement des eaux. La cuvette lacustre ainsi formée est comprise entre 13° et 17° de latitude nord et 3° et 5,3° de longitude ouest avec des pourtours variables selon l'intensité des crues et la rapidité de la montée des eaux. Les lacs qui s'y trouvent ne sont pas alimentés régulièrement et leur volume varie fortement selon la saison et l'importance de la crue.

Sur ce bassin, l'évaporation sur nappe d'eau libre est comprise entre 1900 et 2300 mm an⁻¹. L'évaporation est maximale en fin de saison sèche alors que les terres sont en partie exondées. Au maximum de l'inondation, les facteurs climatiques restent très favorables à l'évaporation. La température est élevée, l'Harmattan souffle régulièrement et le degré hygrométrique est faible.

La région subit un gradient de régime avec, au sud, un climat soudanien et en allant vers le nord passage à un climat sub-sahélien puis désertique. Sur le bassin intérieur proprement dit, les précipitations moyennes annuelles sont comprises entre 200 et 600 mm avec des pluies réparties

de juillet à octobre principalement. Le mois d'août est le plus arrosé. La saison sèche de décembre à avril s'allonge en allant vers le nord (Kamate, 1980).

Sur le socle ancien granitique imperméable reposent des grès horizontaux de pendage N-NO. Les terrains secondaires et tertiaires comportent le Continental Intercalaire et le Continental Terminal formés de grès aquifères. Sur ces terrains se sont déposés des sables, graviers, argiles, sédiments alluviaux et lacustres (Fontes et al, 1991). Les apports éoliens de sables fins et d'argiles sont très importants. Les terrains argileux pseudo-imperméables et hydromorphes en amont du lac Debo passent progressivement à des terrains sableux pouvant permettre l'infiltration des eaux. Le lit du fleuve et les terrains inondés sont pseudo-imperméables. L'infiltration reste possible si le ruissellement amène une concentration des eaux, soit dans le lit des rivières, soit dans les points bas. La nappe superficielle alimente les puits du Mali occidental et septentrional puis glisse au ras du socle vers le continental aquifère Terminal et Intercalaire. Il existe plusieurs niveaux de terrasses alluviales fortement latéritisées.

La végétation est de type soudanienne. Dans les sols limoneux on retrouve une végétation arbustive alors que dans les sols à engorgement prolongé seules les graminées se maintiennent. Les zones à engorgement semi-permanent, nommées bourgoutières sont constituées essentiellement d'*Echinochloa stagnina* (Bertrand, 1976).

Les sols sont utilisés pour des cultures pauvres de mil et d'arachide. Le riz est cultivé pendant la période de crue et le mil le remplace pendant l'étiage.

2.2 Méthodologie

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 dont les relevés quotidiens sont faits par la Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie du Mali. Le positionnement des sites d'observation est le suivant : (Fig. 1)

BASSIN AMONT:	Banankoro (Niger)
	Koulikoro (Niger)
ENTREES DELTA CENTRAL	Ke-Macina (Niger)
	Sofara (Bani)
	Douna (Bani)
SEPARATION DIAKA-NIGER:	Kara (Diaka)
CONFLUENCE NIGER-BANI:	Nantaka (Niger)
SORTIES DU LAC DEBO:	Akka (Issa Ber)
	Awoye (Bara Issa)
	Korientze (Koli-Koli)
SORTIE DELTA CENTRAL:	Dire (Niger)

Un litre d'eau a été collecté sur chacune de ces stations à une fréquence mensuelle ou décadaire. Les prélèvements se font au milieu du cours d'eau à une profondeur de 60 cm.

Les bouteilles sont apportées au centre Orstom de Bamako tous les trois mois. Après mesure des conductivités et du pH, les eaux sont filtrées sur membranes de 0,20 μm de taille de pores.

Un volume de 250 ml d'eau filtrée est envoyé au centre Orstom de Bondy (France) pour l'analyse chimique.

L'analyse du SO_4^{2-} , NO_3^- et Cl^- se fait par chromatographie ionique, les cations majeurs par absorption atomique. Silice, fer et aluminium sont mesurés par spectrométrie d'émission à plasma (ICP). Les limites de détection sont respectivement de 0.5 mg l^{-1} , 0.001 mg l^{-1} et 50 $\mu\text{g l}^{-1}$. L'alcalinité est mesurée par titration à l'aide d'un acide fort (HCl). Les valeurs de fer et aluminium sont le plus souvent au-dessous du seuil de détection et n'ont pas été retenues.

Deux séries de mesures faites à trois mois d'intervalle sur 2 échantillons ont montré des différences de 0.002 à 0.007 még l^{-1} pour les cations (1.5 à 8% selon l'abondance de l'élément), de 0.003 à 0.011 még l^{-1} pour le SO_4^{2-} , NO_3^- et Cl^- (17 à 39%), 0.01 még l^{-1} (2.5 à 5%) pour les mesures d'alcalinité et 1.05 mg l^{-1} (6.8 à 7.3%) pour les mesures de SiO_2 . Le temps de stockage des échantillons avant la filtration est long et les teneurs en chlore, sulfate et nitrate ne doivent pas être prises en compte.

Les balances ioniques se situent en majorité en dessous de 5%. Quelques eaux très faiblement minéralisées ou présentant un pic de K^+ , Cl^- ou HCO_3^- ont des balances élevées. Les analyses où la balance ionique dépassait les 10% n'ont pas été prises en compte (14 séries).

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 (Tableau 1).

Tableau 1 :
Distance et décalage entre les stations de prélèvement.

Stations	distance [km]	décalage [jours]
BANANKORO-KOULIKORO	180	6
KOULIKORO-MACINA	280	4
MACINA-KARA	50	1
MACINA-NANTAKA	150	13
DOUNA-SOFARA	220	5
SOFARA-NANTAKA	60	1
NANTAKA-KORIENTZE	135	13
NANTAKA-AWOYE	115	13
NANTAKA-AKKA	130	13
AKKA-DIRE	180	10

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. Une numérotation régulière par période de 5 jours a été ainsi utilisée pour faciliter les calculs de bilan.

3 RESULTATS-DISCUSSION

3.1 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 (Fig. 2). A la sortie du delta, sur la station de Diré, 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 m^3 d'eau (D.N.H.E, 1990 et 1991).

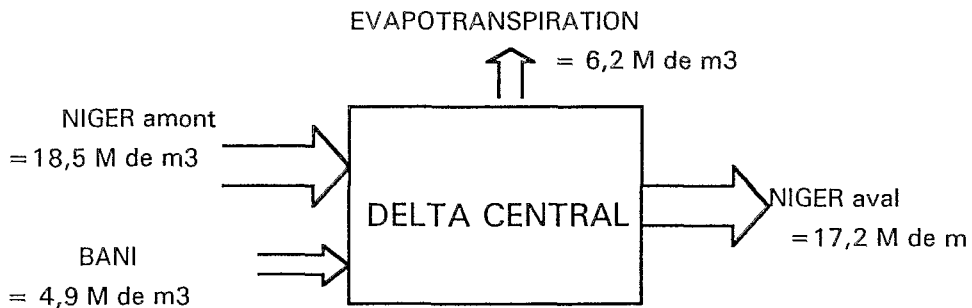


Figure 2
Bilan hydrologique de l'année 1990-91

3.2 Evolution saisonnière de la qualité des eaux

Les eaux du Niger entre Ke-Macina et Dire sont très peu minéralisées. La conductivité varie sur le Bani (Douna) de 22 à 130 $\mu\text{S cm}^{-1}$ avec une moyenne annuelle de 70 $\mu\text{S cm}^{-1}$. A l'entrée du Niger au Mali, à Banankoro, les conductivités varient de 33 à 86 $\mu\text{S cm}^{-1}$ avec une moyenne annuelle de 50 $\mu\text{S cm}^{-1}$. Les stations avec les plus faibles débits présentent les plus grandes variations (26.7 à 109 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 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).

Tableau 2 :

Composition chimique ponctuelle en hautes et basses eaux sur les dix stations étudiées et pourcentage de chacun des éléments par rapport au total dissous

station	date	C		Mg		K		Na		Ta		Cl		NO ₃		SO		SiO		S
		mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l
Banankor	crue	1.8	5	1	3	1.2	3	1.8	5	14.3	41	0.8	2	1	3	LD	0	12.9	37	34.5
	étiag	4.2	6	1.9	3	3.3	3	4.9	7	38.4	55	1	1	0.5	1	LD	0	15.3	22	69.5
Ke-Macina	crue	1.8	4	1.3	3	2.3	5	2.7	6	19.5	46	1.4	3	LD	0	0.2	1	13.7	32	42.9
	étiag	3.1	5	1.5	3	2.1	4	4.1	7	28.1	50	2.3	4	LD	0	1.1	2	14.1	25	56.4
Douna	crue	2.2	6	0.8	2	1.5	4	2.4	7	20.7	56	0.4	1	0.6	2	0.5	1	7.8	21	36.9
	étiag	5.6	7	4.3	5	3.2	4	4.8	6	57.3	68	0.8	1	LD	0	LD	0	1.1	9	84.7
Sofara	crue	3.9	6	2.8	4	4.1	6	4.2	6	37.1	55	2.2	3	0.2	0	0.4	1	12.4	18	67.3
	étiag	6.5	7	4.2	4	5.7	6	6.2	6	61	62	3.2	3	0.3	0	0.3	0	10.4	11	97.8
Kara	crue	1.7	4	1.3	3	2.2	5	2.5	6	18.3	44	1.5	4	LD	0	0.2	1	14.3	34	42
	étiag	5.6	6	5.3	6	5.6	6	7	7	52.5	55	4.9	5	LD	0	0.8	1	13.6	14	95.3
Nantaka	crue	1.6	4	1.2	3	1.9	4	2.5	6	18.9	44	0.5	1	LD	0	0.1	0	16.6	38	43.3
	étiag	3.6	6	1.7	3	3.7	4	4.4	7	30.6	49	2.9	5	0.5	0	0.7	1	14	22	62.1
Akka	crue	2.1	5	1.4	3	2.5	5	2.4	5	22	48	1	2	LD	0	0.1	0	14.4	31	45.9
	étiag	4.9	7	2.2	3	3.1	4	5.3	7	41.5	57	1.9	3	LD	0	0.5	1	13.3	18	72.7
Awoye	crue	2.6	5	1.8	3	3.6	7	3.7	7	26.8	51	2.3	4	LD	0	0.2	0	11.7	22	52.7
	étiag	7.9	8	2.8	3	4.4	4	7.8	8	62.8	64	3	3	0.4	1	0.7	1	14.8	14	104.6
Korientze	crue	3.2	5	2.2	4	3.5	6	3.5	6	34.2	55	3.2	5	LD	0	0.1	0	12.6	20	62.5
	étiag	8.3	8	3.9	4	5.4	5	7.5	7	70.2	66	2.5	2	LD	0	LD	0	9.3	9	107.1
Dire	crue	2.1	5	1.3	3	1.8	4	3.3	7	23.2	51	0.5	1	LD	0	LD	0	13.3	29	45.5
	étiag	3.9	7	2	3	2.5	4	5	8	32.3	54	2.7	4	0.4	1	0.7	1	10.5	18	60

La silice représente entre 9 et 38% du poids total des éléments dissous (tableau 2). Ces fortes teneurs s'expliquent par la géologie du bassin traversé par le fleuve. De plus, la température élevée de l'eau, 20 à 25° en période hivernale et 25° à 30° en saison sèche, augmente la solubilité de la silice (Berner, 1986, Meybeck, 1979).

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 H⁺ (Pickering, 1989).



Les teneurs en sulfates et nitrates nitrates ne représentent que 0 à 2% des éléments dissous totaux mais ne sont pas significatives vu le temps de stockage des échantillons.

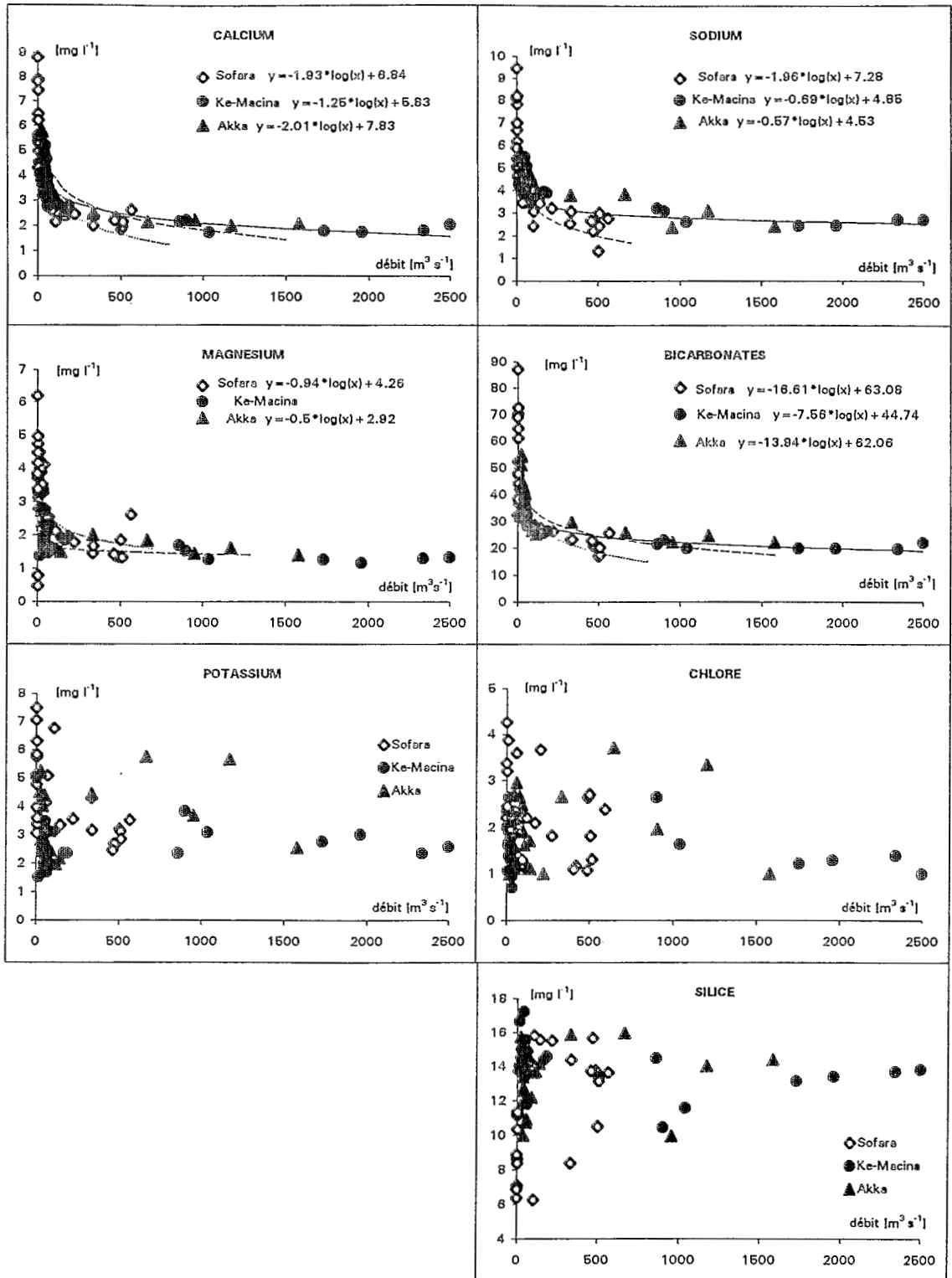


Figure 3
Evolution des principaux éléments dissous en fonction du débit sur trois stations : Sofara (Bani), Ke-Macina (Niger) et Akka (Issa Ber).

La proportion de chaque élément reste stable toute l'année. Seuls les bicarbonates augmentent d'importance à l'étiage au détriment de la silice. Les pH sont alors nettement plus basiques. Les eaux sont moins basiques au début de la crue, au moment où la production est forte (LOWE-McCONNEL, 1985).

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 (Fig. 3).

La relation entre la conductivité et le TDS (Fig. 4) est de la forme

$$\text{TDS} = a \cdot C + b \text{ avec } a=0,79 \text{ et } b=-1,43 \quad (R=0,95 \text{ et } n=230).$$

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.

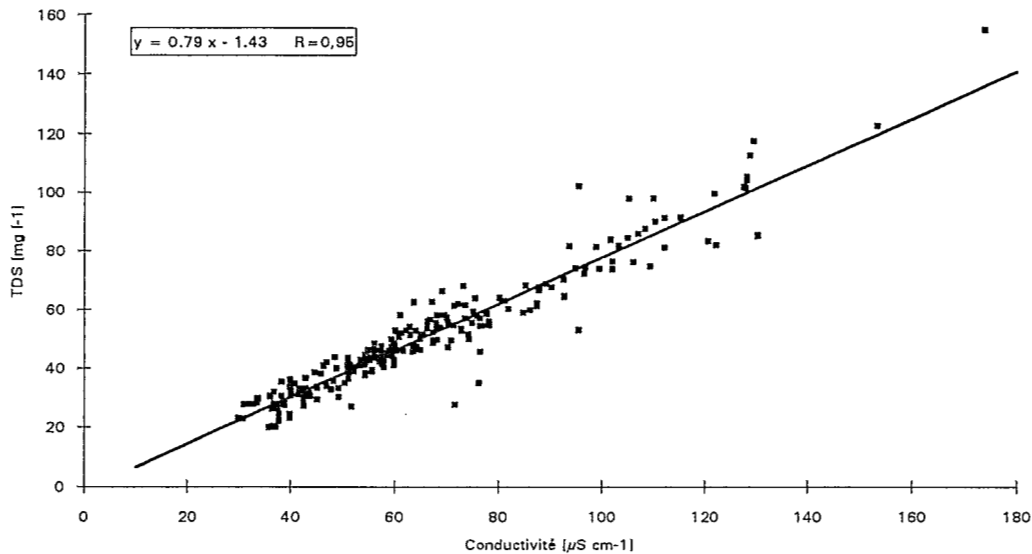


Figure 4 :

Relation entre le TDS (sauf silice) et la conductivité pour toutes les stations.

3.2 Evolution spatiale de la qualité des eaux

L'étude de la somme des éléments dissous montre une évolution annuelle différente selon les stations (Fig. 5).

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 l'écoulement de subsurface 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'infiltrèrent lessivent un sol enrichi en sels. Ces deux types d'eaux arrivent avec un léger retard sur la crue. Sur les stations de Kara jusqu'aux sorties du lac Debo, l'augmentation des concentrations en éléments dissous commence alors que le maximum de crue est déjà passé. Par contre, sur les stations de Macina et Douna, l'importance de l'évaporation sur la nappe superficielle, sur les marais et lacs entraîne un décalage entre la crue et l'augmentation des concentrations en éléments dissous. Toutefois, le manque d'observation durant le début de la crue ne permet pas de tirer de conclusions définitives.

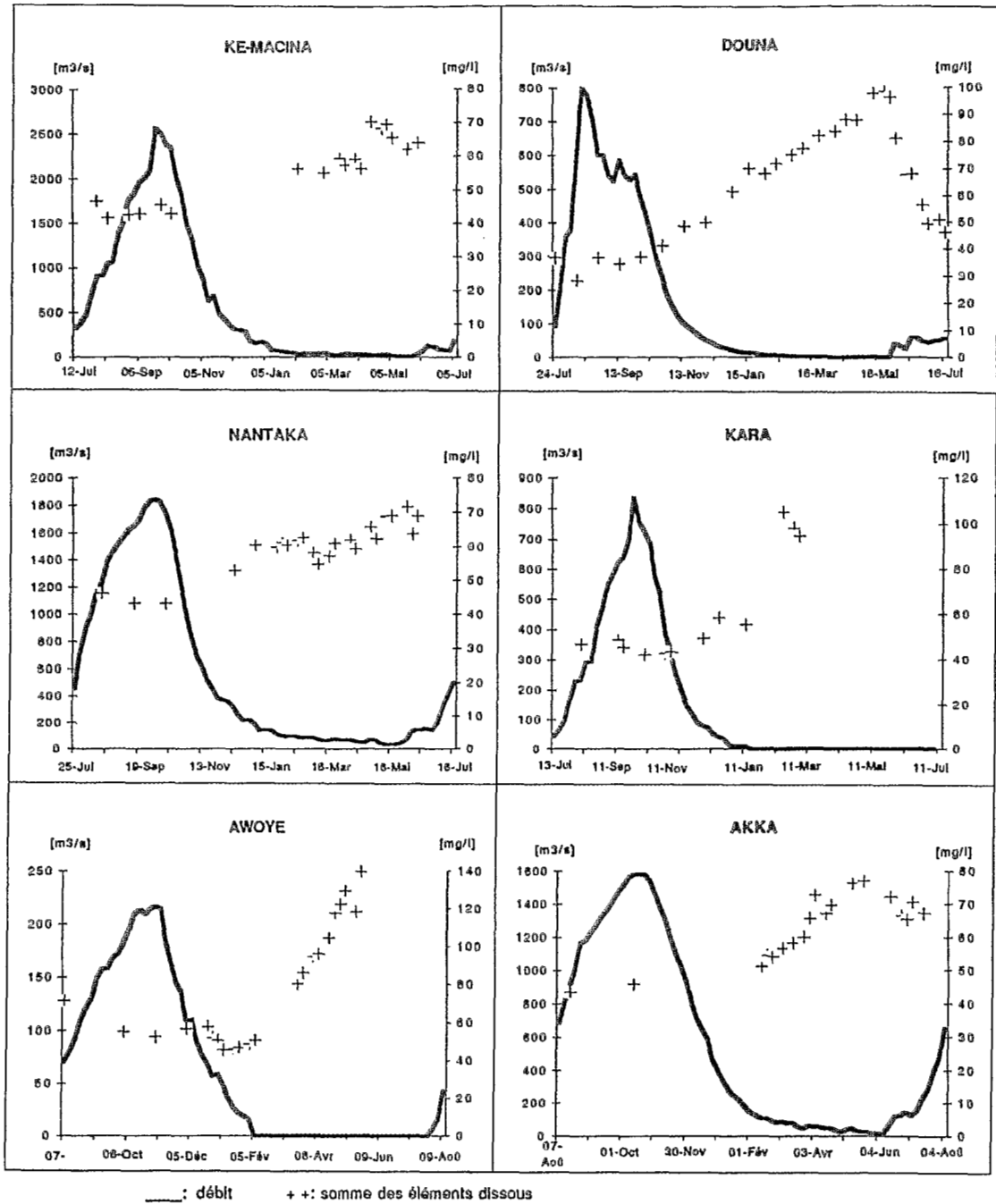


Figure 5
Evolution des éléments dissous (année 1990 - 1991).

3.4 Bilan des éléments dissous

Les bilans correspondent à la période allant du 1 juillet 1990 au 30 juin 1991 à Banankoro (Fig. 6).

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 seront discutés.

Les exportations totales de matières dissoutes aux sorties du lac Debo s'élèvent à $1,03 \cdot 10^6 \text{ t an}^{-1}$.

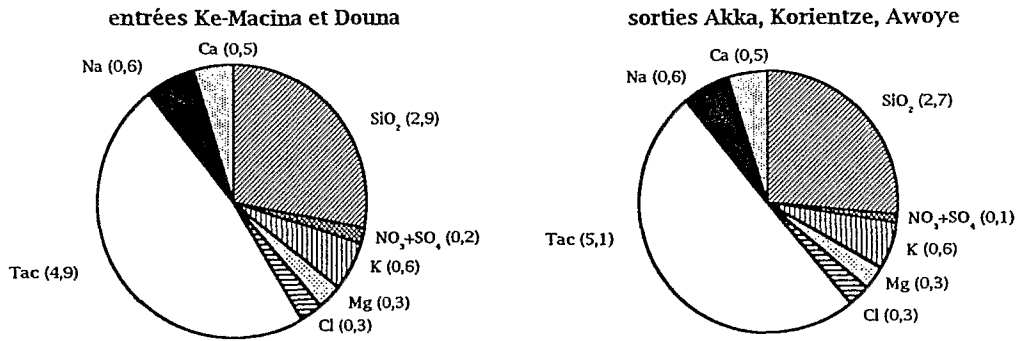


Figure 6
Bilan de matières dissoutes ($10^5 \text{ tonnes.an}^{-1}$)

Entre les entrées (Ke-Macina et Douna) et les stations de Akka, Awoye et Korientze il y a un excès de bicarbonate de 18800 tonnes sur l'année étudiée. Cet excès ne représente que 4% des entrées et n'est donc pas très significatif (tableau 3).

Tableau 3 :
Transport annuel des principaux éléments dissous.

	station	transport de bicarbonates [tonnes.an ⁻¹]	transport de sodium [tonnes.an ⁻¹]	transport de calcium [tonnes.an ⁻¹]	transport de silice [tonnes.an ⁻¹]
entrée	Ke-Macina	393371	52828	37451	249557
	Douna	98800	10996	11051	40982
	total	492171	63824	48502	280539
intermédiaire	Kara	100271	13580	8939	68972
	Nantaka	367041	47886	33418	277628
	total	467312	61466	42357	346600
sortie	Akka	431055	52118	41936	235752
	Awoye	59464	7021	5925	28734
	Korientze	20458	2175	2420	8301
	total	500977	61314	50281	272787

Les stations intermédiaires (Kara et Nantaka) montrent un déficit par rapport aux entrées de 29000 tonnes (soit 6%) et un déficit de 44000 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 (Fig. 7) 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.

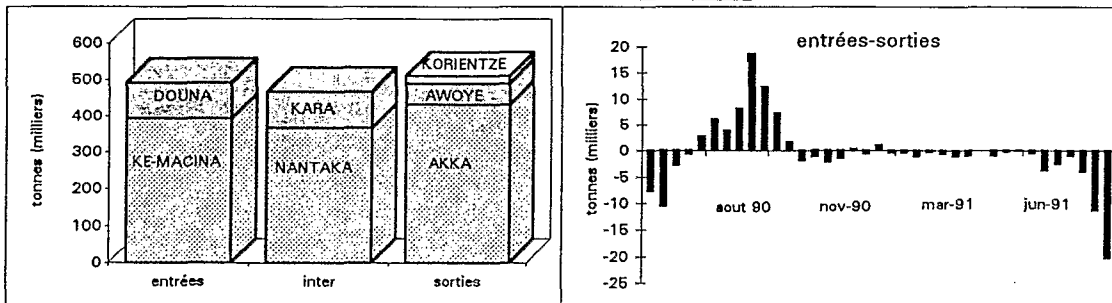


Figure 7
Bilan annuel et décadaire du bicarbonate

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 2500 tonnes (4%). Le Bani et le Niger ont des teneurs similaires en sodium. L'évolution entre les différentes stations est faible (Fig. 8).

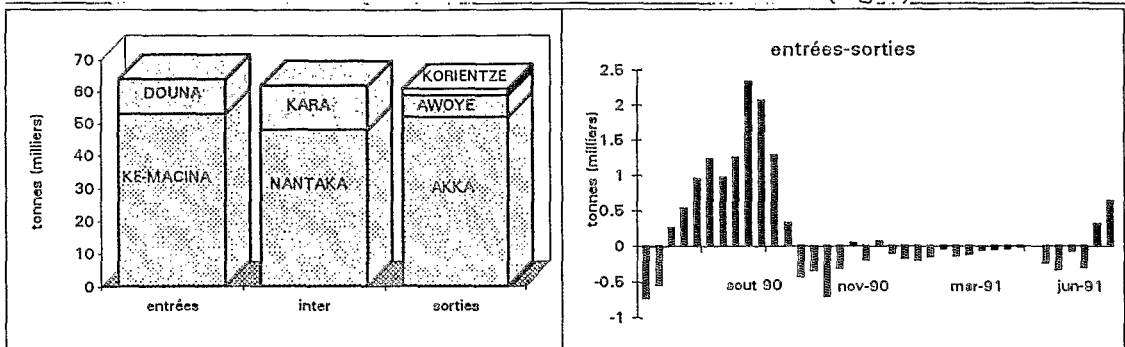


Figure 8
Bilan annuel et décadaire du sodium.

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 (figure 9). 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%.

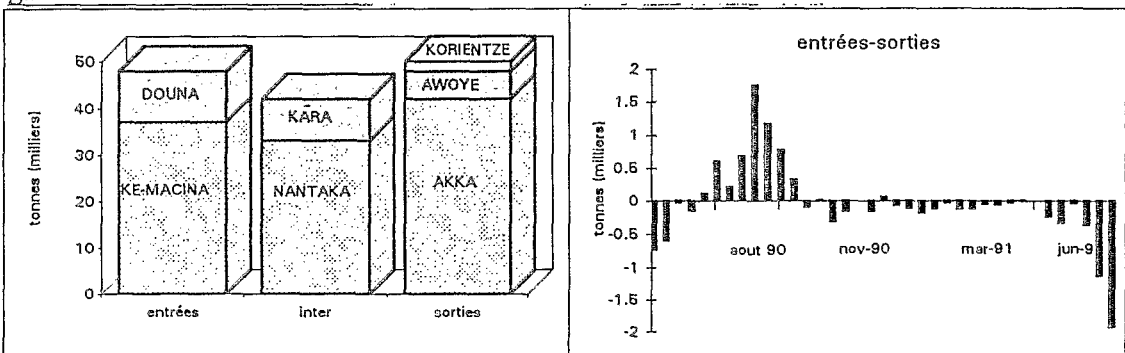


Figure 9
Bilan annuel et décadaire du calcium.

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 18000 tonnes (soit 6% des entrées). Entre l'entrée et les stations de Nantaka-Kara le gain de silice est de près de 19% (figure 10). Par contre, entre les stations intermédiaires et les trois sorties du lac Debo il y a perte de 21%.

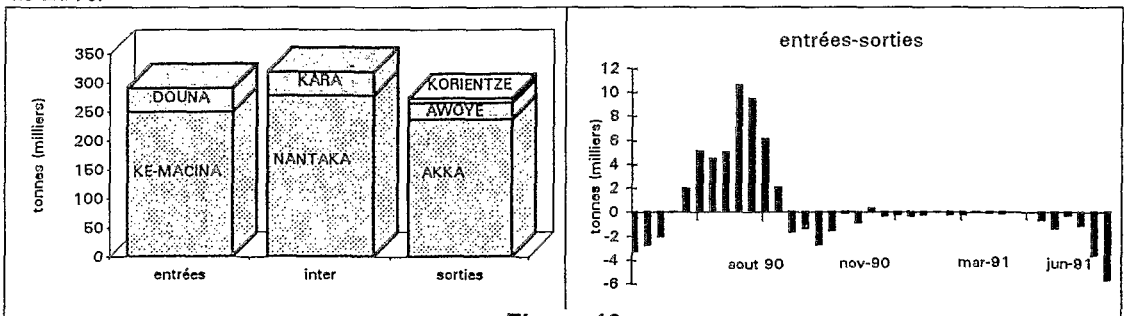


Figure 10
Bilan annuel et décadaire de la silice.

L'évolution des concentrations est régulière depuis l'entrée du Niger au Mali jusqu'aux sorties du lac Débo.

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 du CO₂ atmosphérique 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. Il semble que les apports minéraux par ce fleuve soit sous estimé du fait d'un mélange incomplet des deux fleuves au niveau de Nantaka.

4 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 rend particulièrement difficile l'étude des bilans 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 lac Debo: Akka, Awoye et Korientze.

Actuellement, l'inondation se fait essentiellement sur la partie amont du Debo et notamment le long du Diaka.

De plus, les stations secondaires comme celles de Awoye ou Korientze ont des courbes de tarage non univoques. Les problèmes de mesure de débits liés aux faibles pentes des sections du fleuve 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.

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 (Grove, 1972). Les sels suivent un cycle complexe qui est accentué par une régression constante de la hauteur de l'inondation.

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 annuelle des pluies est nécessaire pour les corrections des apports atmosphériques, sans doute non négligeable à cause des forts vents de poussière régnant sur le milieu.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BERNER E.K. et BERNER R. A., 1986 : Global water cycle. 394 p.
- BERTRAND, R., 1976 : Les écotopes des plaines inondables du moyen Niger. Tellus, vol.XXIV, p.123-150.
- BRUNET-MORET, Y., CHAPERON, P., LAMAGAT, J.P., MOLINIER, M., 1986 : Monographie hydrologique du fleuve Niger, Tome II:cuvette lacustre du Niger moyen 506p. ORSTOM, Paris.
- D.N.H.E., Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie. Annales hydrologiques du Mali 1990 et 1991.

- FONTES, J.Ch., ANDREWS, J.N., EDMUNDS, W.M., GUERRE, A., TRAVI, Y., 1991 : Paleorecharge by the Niger River (Mali) Deduced From Groundwater Geochemistry. *Water Resources Research*, vol.27, N°2, p.199-214.
- GROVE, A.T., 1972 : The dissolved and solid load carried by some West African Rivers: Senegal, Niger, Benue and Shari. *Journal of hydrology*, vol.16, pp.277-300.
- KAMATE, C., 1980 : Climat in: *Les atlas jeune Afrique, MALI* pp.14-17. éd.jeune Afrique, Paris.
- LOWE-McCONNEL, R.H., 1985 : The biology of the river systems with particular reference to the fishes. pp.101-140. in: *The Niger and its neighbours*. éd. A.T.Grove, A.A.Balkema/Rotterdam/Boston. 331p.
- MEYBECK, M., 1979 : Concentration des eaux fluviales en éléments majeurs et apports en solution aux océans. *revue de géologie dynamique et de géographie physique*, vol.21, fasc.3, p.215-246.
- OLIVRY, J.C., 1990 : *Environnement et Qualité des Apports du Niger au Sahel*. Avant-Projet. Orstom, Bamako, 50p.
- PICKERING, W.F., 1989 : Dissolution, sorption and complex formation, p.259-305, in: *Weathering; its products and deposits*, vol.I, Processes. Theophrastus publications, S.A., 462pp.