A photograph of a riverbank with palm trees and a building. The image is the background of the entire page. It shows a wide river in the foreground with some white foam or rapids. In the middle ground, there is a sandy bank with several palm trees and a large, dark, rectangular building. A few small figures of people are visible on the bank. The sky is bright and clear.

**QUELQUES DONNEES PRELIMINAIRES SUR
L'ENVIRONNEMENT ET LA QUALITE DES
APPORTS DU NIGER AU SAHEL**

Editeurs Scientifiques

J.C. OLIVRY, M. DIALLO IAM, J.P. BRICQUET

Novembre 1994

O.R.S.T.O.M. - C.N.R.S.T.

**QUELQUES DONNEES PRELIMINAIRES SUR
L'ENVIRONNEMENT ET LA QUALITE DES
APPORTS DU NIGER AU SAHEL**

Editeurs Scientifiques

J.C. OLIVRY, M. DIALLO IAM, J.P. BRICQUET

Novembre 1994

O.R.S.T.O.M. - C.N.R.S.T.

SOMMAIRE

Avant propos	p. 5
Le régime hydrologique du Niger supérieur et le déficit des deux dernières décennies.	p. 9
Le fonctionnement hydrologique de la Cuvette lacustre du Niger et essai de modélisation de l'inondation du delta intérieur.	p. 27
Premiers résultats sur la mesure des flux de matières dissoutes et particulaires dans les apports du Niger au Sahel.	p. 43
Premiers résultats sur la distribution et le bilan des éléments majeurs dissous dans la Cuvette lacustre du fleuve Niger (année 1990-1991).	p. 57
Les apports détritiques terrigènes dans la Cuvette lacustre entre Mopti et Konna (Rép. du Mali).	p. 71
Changement climatique au Mali et tendance à la désertification.	p. 83
Données sur les transports du Niger moyen entre Kandadji et Niamey	p. 93
Liste des annexes	p. 111

AVANT-PROPOS

Avant de proposer dans cette publication les premières contributions au projet "ENVIRONNEMENT ET QUALITE DES APPORTS DU NIGER AU SAHEL" (projet EQUANIS), il convient de rappeler ici la démarche qui a conduit le CNRST Mali et le Département des Eaux Continentales de l'ORSTOM à élaborer ce projet de recherches multidisciplinaires, le cadre dans lequel celui-ci se situe par rapport aux problèmes de développement et aux grands programmes scientifiques sur l'Environnement de la planète et les objectifs des recherches entreprises ou à entreprendre.

Le projet se situe dans un contexte où les projections démographiques et économiques du Continent Africain laissent mal augurer d'une évolution favorable de l'environnement naturel, de ses ressources et de la production alimentaire, en particulier dans les zones sahéliennes qui comptent parmi les plus défavorisées.

Mais une des rares chances du Sahel est d'être traversé par de grands fleuves dont les apports ont souvent justifié les réalisations - ou seulement les projets - d'une agriculture irriguée à haut rendement théorique sur des superficies importantes, réponse partielle, mais souvent discutée, du développement de ces régions.

La crise climatique actuelle et les dégradations de l'environnement consécutives à une longue sécheresse ont sur le régime des fleuves des conséquences durables qui n'étaient pas soupçonnées jusqu'à de récentes études. Ces fleuves sont "malades" et montrent en particulier une baisse importante des ressources de basses-eaux, pouvant remettre en cause dans un proche avenir jusqu'à leur pérennité.

L'environnement, l'abondance et la qualité des eaux des fleuves parvenant au Sahel, fécondant celui-ci, deviennent autant d'éléments déterminants du devenir de ces régions qu'il convient de suivre, de comparer aux données antérieures ou voisines, dont l'évolution doit être caractérisée par rapport **aux aléas climatiques et à la variabilité globale du climat.**

- D'où la nécessité **d'observatoires des grands fleuves Soudano-Sahéliens** qui existent déjà sur le plan des débits liquides (réseaux hydrométriques nationaux, stations de référence WHYCOS-OMM) mais beaucoup plus rarement sur le plan de la qualité des eaux *lato sensu*;

- D'où la nécessité aussi d'identifier les dégradations des bassins amont et leur contribution aux bilans d'érosion, d'abord pour les zones anthropisées ou des problèmes de **conservation des sols** se posent, ensuite pour le milieu naturel (phytogéographie) où ces dégradations sont susceptibles d'expliquer, avec la climatologie, l'appauvrissement des châteaux d'eau d'Afrique de l'Ouest : **un cadre de recherche conforme à la thématique de l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS)**, conforme également au programme d'étude des environnements liés à la Géosphère en milieu intertropical (**PEGI**).

Les apports des fleuves au Sahel, en dehors de tout aménagement et utilisation agro-industrielle, constituent, par définition mais aussi au sens des développeurs, donc au plein sens du terme, une **ressource renouvelable** - particulièrement importante ici pour d'autres ressources renouvelables biotiques, comme support de la **ressource halieutique** et de la **ressource végétale** (prairies inondées, bourgoutières) - de par son volume hydrique et les surfaces mises en eau, mais aussi par sa charge minérale et organique en suspension ou en

solution. La variabilité de cette ressource hydrique conditionne celle des autres ressources renouvelables dont dépend la vie des populations des vallées et des plaines d'inondation du Sahel.

Parmi ces cours d'eau, le **Niger** est le fleuve le plus important de la région ; troisième fleuve d'Afrique par sa longueur et la superficie de son bassin, il perd près de la moitié de ses apports amont en traversant la cuvette lacustre (plus de 30.000 km² pour le Delta Intérieur). C'est son étude qui a donc été retenue dans le projet EQUANIS. A l'ouest, le bassin du fleuve Sénégal a déjà fait l'objet d'études (EQUESEN) financées par la CEE visant à préciser l'incidence sur le milieu et l'environnement des aménagements hydrauliques. A l'est, le bassin du Lac Tchad et les apports du fleuve CHARI ont également été étudiés dans le passé (hydrologie, qualité des eaux, hydrobiologie).

Les Apports du Niger au Sahel constituent un objet de recherches plurithématiques qui ressortent, le plus souvent simultanément, de la recherche cognitive et de la recherche finalisée. L'articulation des différents thèmes entre eux met en lumière la pluridisciplinarité du projet.

Parmi **les objectifs scientifiques du Projet**, on a notamment retenu :

- 1) d'identifier le fonctionnement biogéodynamique du bassin amont du fleuve Niger et de son affluent, le Bani, en contrôlant la variabilité du régime hydrologique (hydroclimatologie, bilan hydrique...) et celle des flux particuliers et dissous, en liaison avec l'évolution environnementale des bassins supérieurs (**couverture végétale par télédétection..**), donc de caractériser le système ressource-amont du Niger (apport hydrique, transferts de matière minérale et nutriments), de définir la part relative des éléments et matières provenant de l'altération continentale, des apports atmosphériques (CO₂) et de la biomasse, et enfin d'identifier les zones sensibles à l'érosion en vue d'une politique de conservation des sols.
- 2) d'évaluer le devenir des apports du Niger dans le Sahel, en particulier dans le Delta Intérieur et la boucle du Niger, en contrôlant sur le Niger et le Bani et les divers effluents du Delta Intérieur tout au long du cycle hydrologique et en particulier lors de la crue annuelle, d'une part, l'évolution des débits d'amont en aval, d'autre part, l'évolution quantitative et qualitative de la charge solide en suspension (dépôts et reprise de berges), de la charge dissoute, de la composition isotopique des eaux, de la production primaire et des apports atmosphériques (sables éoliens, aérosols, événements pluvieux).
- 3) de déterminer l'extension des zones d'inondation dans le Delta intérieur et la Boucle du Niger à un pas de temps mensuel (ou décadaire), calé sur le maximum de la crue à partir, d'une part, du bilan hydrique obtenu par le calcul des pertes hydrologiques et de l'évaporation (climatologie) et des bilans hydrochimique et isotopique obtenus par l'étude des concentrations et du rapport isotopique, d'autre part, de l'interprétation de **l'imagerie satellitaire** avec "vérité terrain".
- 4) de modéliser le fonctionnement hydrologique et hydrochimique des apports du Niger dans le Sahel malien, et en particulier son Delta intérieur, avec prédétermination de situations médianes et de récurrences faibles en années sèches et humides, calage sur les données hydrologiques anciennes et celles tenant compte de l'aménagement de Sélingué.

- 5) d'évaluer les flux de gaz organiques produits naturellement sur l'ensemble du Delta (bourgoutières, marais...) et plus particulièrement le méthane qui est le composant organique chimique le plus répandu dans la troposphère et contribue notablement à l'effet de serre.
- 6) de permettre de rattacher la variabilité de la ressource renouvelable constituée par les apports du Niger (flux hydriques, minéraux et organiques) à celle des ressources biotiques (production halieutique et production fourragère).

Au niveau du Fleuve Niger, ce projet devrait donc permettre de compléter dans les régions intertropicales le réseau actuellement mis en place pour le contrôle de l'**écoulement continental** global par un certain nombre d'**observatoires de l'environnement**. Mis en place pour de longues périodes, ces observatoires sur les **flux de matières** serviront de stations de référence dans le futur pour la mise en évidence d'éventuelles dégradations du milieu par l'homme, en les caractérisant au niveau des différents écosystèmes.

Sur le plan de l'organisation, le projet EQUANIS est placé sous la codirection du CNRST (Centre National de Recherche Scientifique et Technologique) et de l'ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération), le CNRST fédérant les interventions de la partie malienne et l'ORSTOM celles des partenaires extérieurs.

Les différentes opérations identifiées ont été regroupées en deux grands Volets, basés sur la collaboration de plusieurs équipes scientifiques.

1er Volet

Fonctionnement biogéodynamique et ressources renouvelables du bassin du Niger et de la cuvette lacustre (AQUANIS).

Il comprend 3 thèmes :

- a) - Mesure des flux, bilans et variations saisonnières, et interannuelles sur le Niger et dans la Cuvette Lacustre.
- b) - Fonctionnement hydrogéodynamique et bilan hydrologique; Estimation des surfaces inondées.
- c) - Activités biogéochimiques de la cuvette.

2ème Volet

Exploitation de l'imagerie satellitaire sur le bassin supérieur du Niger et sa Cuvette Lacustre (ISANIS).

Il est constitué par 4 thèmes :

- a) - Erosion et environnement, conservation des sols du bassin du Niger.
- b) - Hydrologie, géomorphologie de la Cuvette Lacustre.
- c) - Détermination des précipitations par télédétection.
- d) - Télédétection des couches thermiques et de poussières.

Ces grands volets, que l'on prévoit de compléter en fonction de nouvelles associations scientifiques ou d'une extension du projet se sont développés de façon très variable suivant les thèmes d'étude et les budgets propres des Instituts.

En terminant la présentation de ce premier rapport d'étape du Projet EQUANIS, il convient de mentionner les contributions effectives des différents organismes participant au projet :

- Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique et Institut Supérieur de Formation à la Recherche Appliquée (5 chercheurs).
- Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie, service Hydrologique.
- Météorologie Nationale
- Unité de Recherche 2.2. du Département Eaux Continentales de l'ORSTOM.
- Laboratoires des Formations Superficielles de l'ORSTOM à Bondy.
- Collaborations avec les laboratoires de l'INSU et du CNRS France.

Octobre 1994

J.C. OLIVRY

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

J.C. OLIVRY, J.P. BRICQUET, F. BAMBA & M. DIARRA

RESUME :

Troisième fleuve d'Afrique, le Niger a un bassin supérieur qui totalise, avec celui du Bani, 250 000 km² à l'amont de la Cuvette lacustre. Le régime hydroclimatique du Niger supérieur est bien connu, les observations sur les débits à Koulikoro remontant au début du siècle. Les précipitations varient de plus de 1500 mm an⁻¹ dans les montagnes de Guinée à environ 200 mm an⁻¹ dans le delta intérieur. Les chroniques de débits permettent de suivre l'hydraulicité du fleuve et montrent un appauvrissement de la ressource en eau depuis deux décennies de déficits pluviométriques. Le volume annuel écoulé a diminué de 20% pendant la décennie 70 et de 46% pendant la décennie 80. Cet appauvrissement durable, en dépit de déficits pluviométriques moins importants, est lié à un amenuisement des ressources souterraines mis en évidence dans l'observation d'une phase de tarissement nettement plus rapide au cours des dernières années. Cette contribution réduite de l'écoulement de base à l'hydrogramme de crue explique aussi la persistance de faibles maximums annuels.

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 rivers flows from the humid Guinean mounts (annual precipitation more than 1500 mm year⁻¹) to the semi-arid areas (precipitations less than 200 mm year⁻¹). Hydrological and climatic parameters are defined on the Niger basin. 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). During the last few years, the rainfall deficits have been less important but the runoff kept on decreasing. A large reduction of the groundwater storage, shown in the study of the yield recession curves, explains the persistent degradation of the hydrological resource and also the lower values of the annual floods.

INTRODUCTION

Issu de la Dorsale Guinéenne qui sépare la Moyenne Guinée et la Guinée Forestière de la Sierra Léone et du Libéria, le Niger, troisième fleuve d'Afrique par sa longueur (4200 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. M. Pardé (1933) l'a décrit ainsi : *"Le bas Niger, par sa courbe à deux maxima, fait croire à une alimentation double, et c'est une impression fautive. En réalité, dans tout son bassin, ce fleuve ne connaît qu'une seule et même période pluvieuse, celle de l'été tropical. Mais les particularités du tracé en plan et du profil en long et en travers dédoublent curieusement la saison des hautes eaux... Le Niger sénégalien vers Bamako et le tronçon inférieur en aval de Say éprouvent à la fois une crue saillante d'été avec maximum de septembre. Mais le volume liquide mis en mouvement sur le cours supérieur s'attarde bientôt à l'excès, et s'épuise en partie par évaporation et infiltration, avant le coude de Tombouctou, à cause de l'insignifiance de la pente et de l'énormité du champ d'inondation où les eaux s'évalent et s'immobilisent presque. Le flot principal, qui est passé à Koulikoro vers le 25 septembre en moyenne, arrive à Tombouctou seulement vers le 1er janvier; puis il ne franchit Niamey, très*

aplatis, que vers le 2 février, donc six mois après les pluies qui l'ont produit. Sur le bas Niger cette crue sénégalienne, **ralentie de façon nulle par ailleurs constatée sur le globe**, ne participe pas à l'intumescence locale d'été ; mais elle freine la baisse des eaux, à partir de novembre ou de décembre ; elle finit même par prendre l'avantage sur elle et par provoquer une montée graduelle jusqu'à un maximum de mars bien inférieur à celui de septembre. C'est l'exemple le plus grandiose de l'influence que peuvent exercer les conditions d'écoulement dues au relief sur le régime des eaux courantes." (Fig. 1).

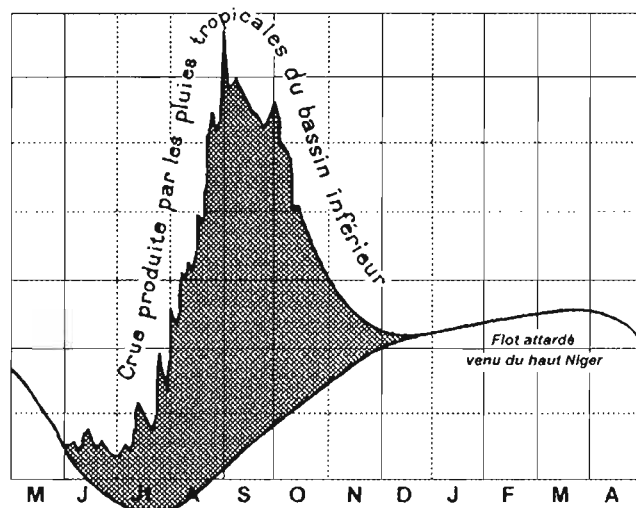


Figure n°1

Exemple de limnigramme du Niger à son arrivée dans le delta maritime ; 1 carreau correspond à 1 mètre de hauteur d'eau ; d'après Pardé 1933.

1 - HYDROLOGIE DU NIGER SUPERIEUR

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 son confluent avec le Bani à Mopti dont le bassin versant est à peine plus petit que celui du Niger supérieur. (Fig. 2).

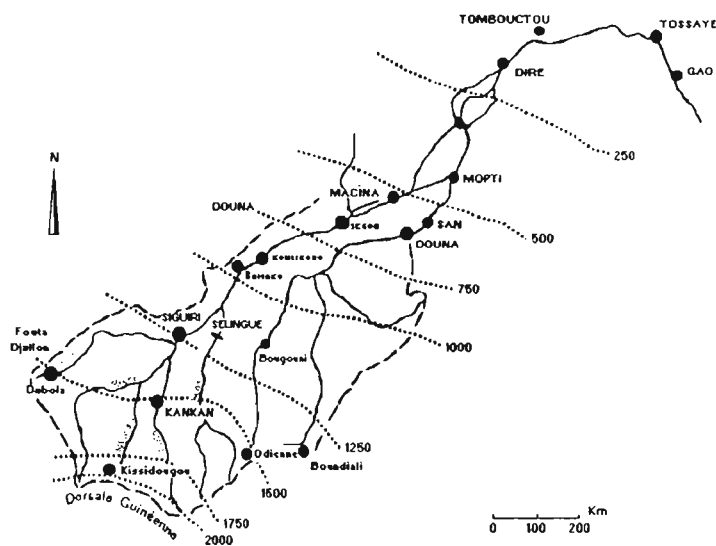


Figure n°2

Bassin supérieur du Niger et isohyètes interannuelles en mm

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 1500 mm.

- **Le domaine sud-soudanien** correspondant au climat tropical pur. Il est centré sur Siguiri-Bougouni-Sikasso. Les précipitations annuelles sont comprises entre 1000 et 1500 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 (Fig. 3).

Tableau 1 :
Quelques caractéristiques climatiques du bassin du fleuve Niger

Paramètres	Guinée			Mali			
	Macenta	Kankan	Siguiri	Bamako	Ségou	Mopti	Tombouctou
T° moy. ann.	24.0	26.0	26.9	28.5	28.6	27.7	29.1
T° x mois (x)*	(3)34.6	(3)36.2	(3)38.0	(4)39.4	(4)41.2	(5)40.0	(5)43.2
T°n mois (n)*	(12)14.0	(12)14.2	(1)13.8	(1)17.6	(1)15.4	(1)14.0	(1)13.0
Üx ann % **	96	90	85	73	74	75	54
Ün ann % **	58	45	39	33	32	31	21
1/2 (Üx + Ün) % mars	69	51	40	26	31	30	21 (avril)
1/2 (Üx + Ün) % août	85	82	81	79	80	78	68
P (Précipitations interannuelles) mm	2100	1508	1250	985	650	415	180
Nbre de mois secs ***	1 à 2	4 à 5	6	7	8	8 à 9	10

* Entre parenthèses, le numéro du mois de température maximum (x) et minimum (n)

** Üx et Ün sont respectivement les humidités relatives moyennes annuelles maximale et minimale ; $(\bar{U}_x + \bar{U}_n)/2$ correspond aux humidités relatives moyennes du mois le plus sec (mars) et du mois le plus humide (août).

*** Suivant la définition de Gaussen, un mois est dit sec lorsque $P_{mm} < 2T^{\circ}C$.

La chronique des débits du Niger constitue avec celle du Sénégal à Bakel, l'information intégrée la plus complète que l'on ait sur les variations hydroclimatiques de l'Afrique de l'Ouest depuis le début du siècle. La première station hydrométrique du fleuve Niger a été installée à Koulikoro en 1907 ; le bassin versant du Niger couvre à cette station une superficie de 120 000 km² dont seulement un cinquième au Mali. Le débit moyen interannuel calculé sur 83 ans est de 1420 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 1600 mm et une lame d'eau écoulée de 370 mm, le coefficient d'écoulement moyen atteint 23% ; la reprise par évaporation serait de 1230 mm (Brunet - Moret et al, 1986).

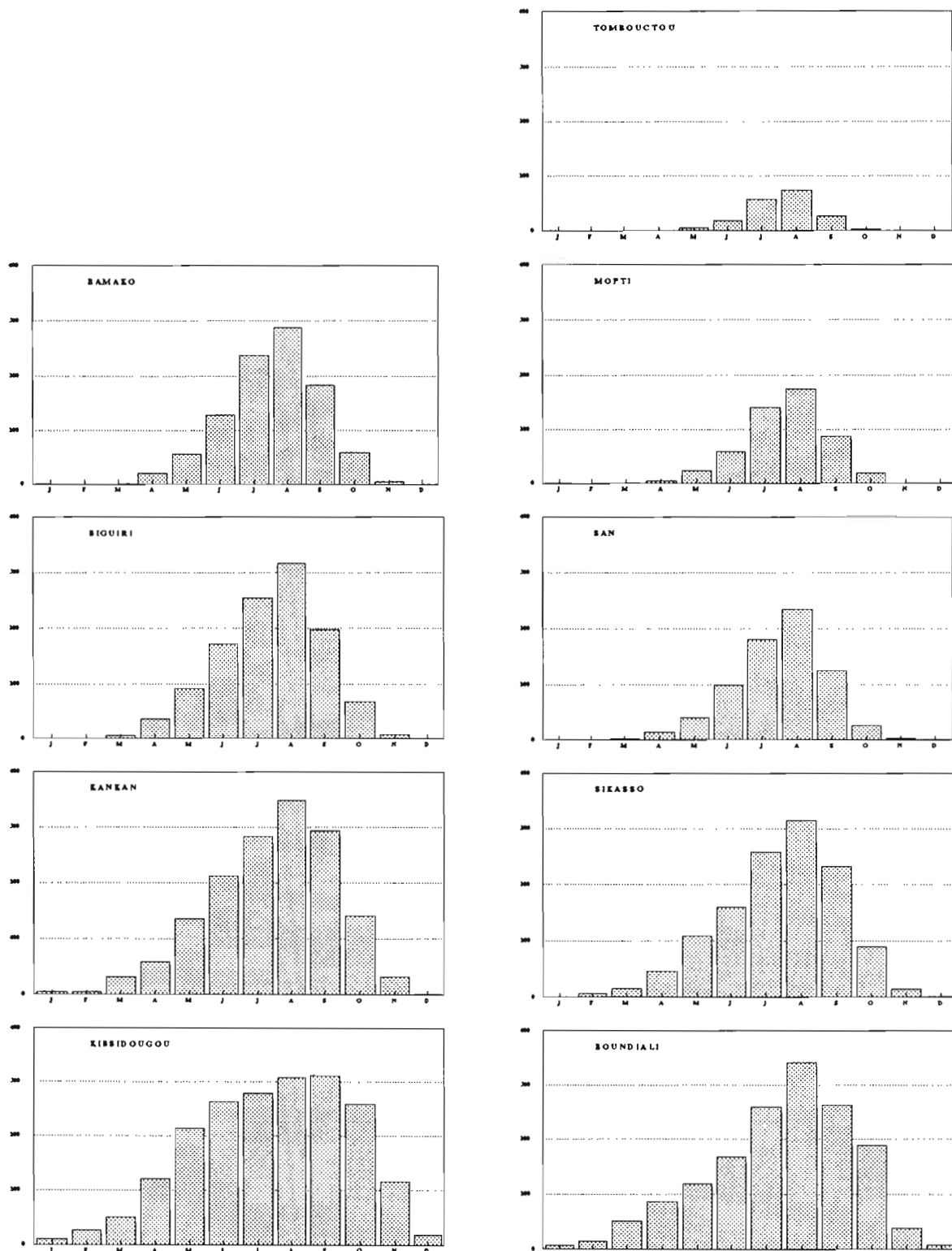


Figure n° 3

Histogrammes des précipitations mensuelles interannuelles sur le bassin du Niger (en mm).

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

généralement dans la seconde quinzaine de septembre. La décrue est rapide et dès la fin novembre, on se trouve en phase de vidange des réserves souterraines.

Le barrage hydro électrique de Sélingué sur le Sankarani - avec une réserve de $2 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ (moins de 5% de l'écoulement total interannuel) - n'affecte pas de manière significative le régime des hautes eaux ; en revanche, les étiages se trouvent renforcés.

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

En rive droite du Niger, le Bani draine les eaux d'un bassin versant à peine moins important que celui du Niger. Le bassin du Bani dont les limites Sud se situent près d'Odienné et Boundiali en Côte d'Ivoire est nettement moins arrosé (1200 mm) que le Haut Niger guinéen. Il est soumis au climat tropical pur. Le bassin a une superficie de $101\,600 \text{ km}^2$ à la station de Douna, observée de manière fiable depuis le début des années 50. Sur la période 1953-1990, le module interannuel est de $419 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, soit un module spécifique de $4,12 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ ce qui correspond à une valeur presque trois fois plus faible que celle du Niger calculée sur la même période ($11,2 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). La lame écoulée est de 130 mm, soit un coefficient d'écoulement de 10,8%. La variabilité saisonnière des débits montre une longue période de faibles écoulements (moins de 5% de l'écoulement annuel transite à Douna sur 6 mois). A l'étiage, on a pu observer dans les années récentes un arrêt de l'écoulement. Le tiers de l'écoulement annuel transite en septembre, près des quatre cinquièmes d'août à octobre. La crue du Bani atteint le plus souvent son maximum dans la seconde quinzaine de septembre ou début octobre ; il n'y a pas coïncidence de date entre les maximums du Niger et du Bani. La variabilité saisonnière interannuelle des débits mensuels observés aux trois stations est indiquée dans le tableau 2.

Tableau 2 :

Débits moyens mensuels interannuels à Koulikoro (1), Ké-Macina (2) et Douna (3) sur la période 1953-91 en $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$

	M	J	Jt	A	S	O	N	D	J	F	M	A	Année
1	97	321	1105	2931	4878	4178	1912	779	348	172	96	68	1342
2	46	182	889	2500	4077	3490	1653	711	321	151	79	51	1207
3	16	31	133	780	1712	1564	699	244	111	60	24	17	419

Dans le tableau 3, on a réuni quelques valeurs significatives de l'étude statistique des modules de Koulikoro, de Ké-Macina et Douna pour ce qui caractérise les entrées dans le Delta Central ; les maximums de crue ont été également étudiés. On verra plus loin que ces distributions montrent le regroupement des valeurs actuelles dans une gamme très déficitaire. Le tableau 3 est complété par les résultats de l'analyse fréquentielle des modules de Diré et Tossaye, à l'aval du Delta et celle de la hauteur maximum de crue à Mopti.

La figure 4 propose trois hydrogrammes caractéristiques de la série des observations du Niger à Koulikoro (maximum, minimum et année moyenne) ; les trois hydrogrammes les plus récents correspondant aux années d'étude du Projet Environnement et Qualité

des apports du Niger au Sahel (EQUANIS) y ont également été représentés. Les hydrogrammes du Bani de 1990, 1991 et 1992 sont donnés dans la figure 5.

Tableau 3 :

Analyse fréquentielle de quelques paramètres hydrologiques observés sur le bassin du Niger (modules et maximums)

Période de retour en années	Années humides			Médiane	Années sèches		
	100	20	10	2	10	20	100
Modules en m³s⁻¹							
KOULIKORO (NIGER)	2366	2089	1940	1419	898	750	472
KE MACINA (NIGER)	2259	1985	1838	1322	807	661	387
DOUNA (BANI)	918	854	827	419	153	84	70
DIRE (NIGER)	1753	1521	1399	979	574	462	255
TOSSAYE (NIGER)	1596	1395	1287	908	528	421	219
Maximum de crue en m³s⁻¹							
KOULIKORO (NIGER)	9330	8290	7735	5590	3800	3300	2260
KE MACINA (NIGER)	6534	6240	6060	5470	2950	2590	1990
DOUNA (BANI)	4460	3560	3480	2425	806	565	364
Hauteur Max à Mopti (cm)	759	745	733	655	527	483	394

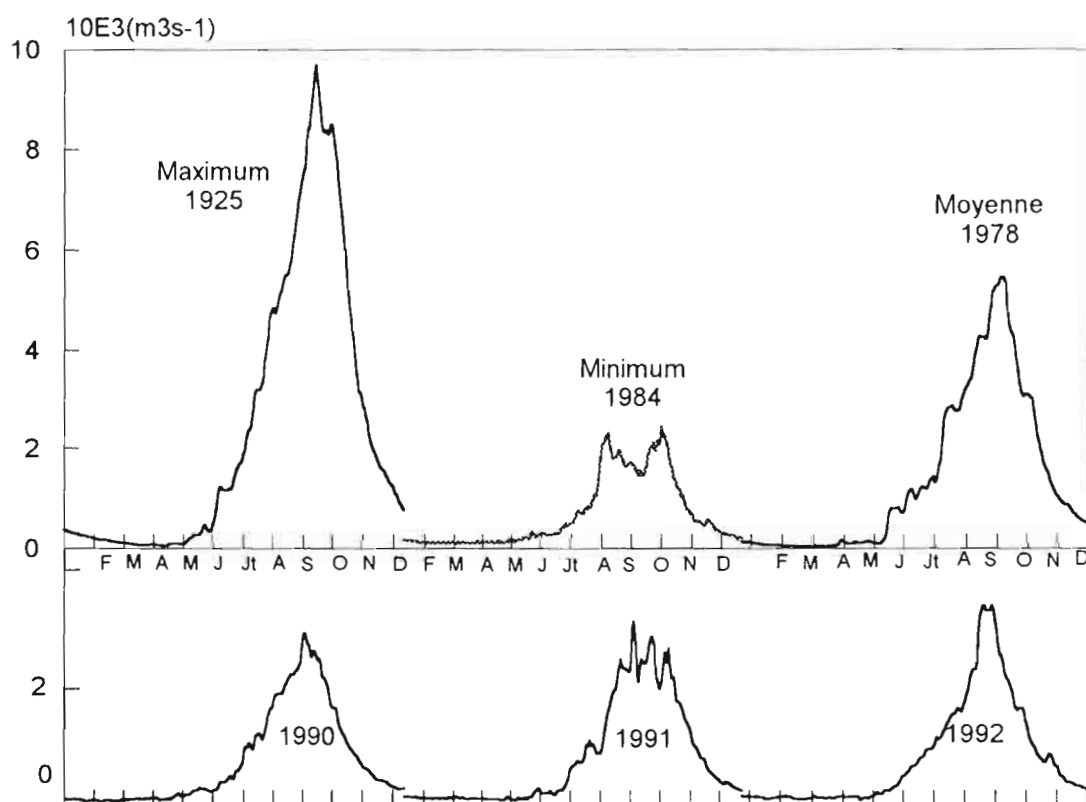


Figure n°4
Hydrogrammes caractéristiques du Niger à Koulikoro

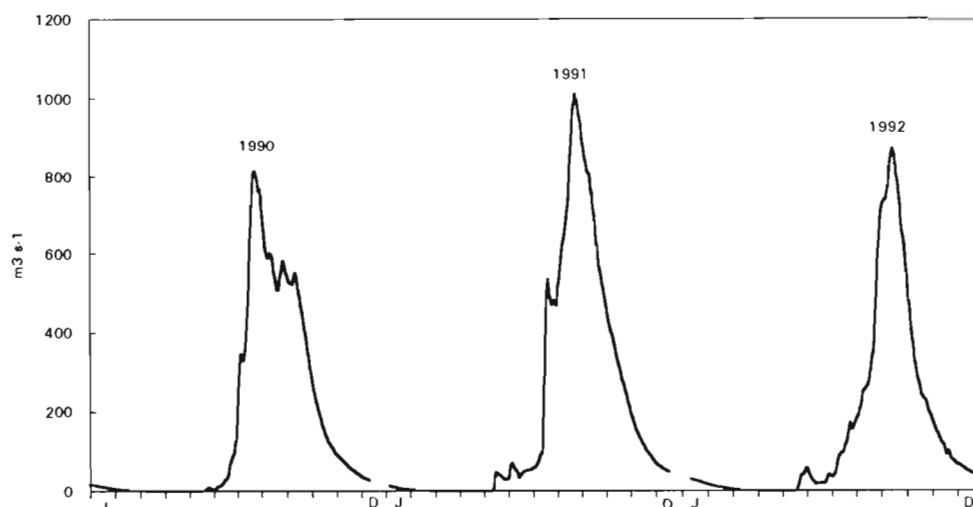


Figure N°5
Hydrogrammes du Bani à Douna

2 - LE CONTEXTE DEFICITAIRE REGIONAL

2.1- L'évolution récente des précipitations et des écoulements

En Afrique tropicale sèche les déficits pluviométriques, marqués par une première phase aiguë dans les années 1972 et 1973, n'ont jamais cessé, même s'ils ont varié en extension et en intensité suivant les années. Une recrudescence notable de la sécheresse s'est manifestée en 1983 et 1984 et les déficits restent la règle jusqu'à la période actuelle. Ceux-ci se sont exacerbés au niveau des écoulements des grands fleuves. L'ampleur géographique du phénomène et sa durée, sans équivalence connue dans les chroniques hydroclimatiques (Sircoulon, 1987, 1989), ont conduit certains auteurs à parler de rupture climatique (Carbonnel & Hubert 1985).

Dans les régions soudano-sahéliennes, les hauteurs annuelles de précipitation montrent une tendance à la baisse particulièrement accusée dès 1968 avec des valeurs presque toujours inférieures aux médianes. Certains indices régionaux (Lamb, 1985, Nicholson *et al.*, 1988) montrent cette dégradation constante depuis vingt ans. Une amélioration récente a été observée mais reste encore très relative puisque les précipitations annuelles sont toujours déficitaires. La figure 6 actualise les travaux de S. Nicholson (op.cit) jusqu'en 1990.

Jusqu'à une période récente, on a pensé que la variabilité de l'écoulement annuel constituait, par l'intégration spatiale du régime des précipitations qu'il suppose sur l'ensemble d'un bassin versant, un paramètre de choix dans l'étude des fluctuations climatiques (Olivry 1983, 1987). De fait, les déficits pluviométriques se sont largement répercutés, et généralement amplifiés, dans l'écoulement des bassins fluviaux au point que dans la période la plus récente les paramètres hydrologiques ne sont plus en phase avec la variation pluviométrique annuelle (Fig. 6).

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, 75, 76 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 84. La figure 7 reproduit la chronique des modules du Niger à Koulikoro et Diré et du Bani à Douna.

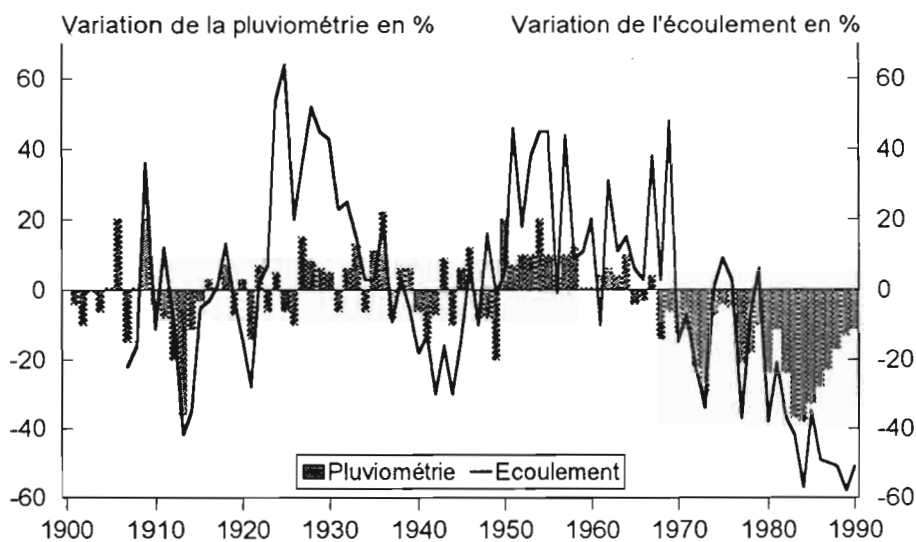


Figure n°6

Index pluviométrique et variation de l'écoulement sur le bassin du Niger exprimés en écart à la moyenne (d'après Nicholson, 1988 et Olivry, 1992).

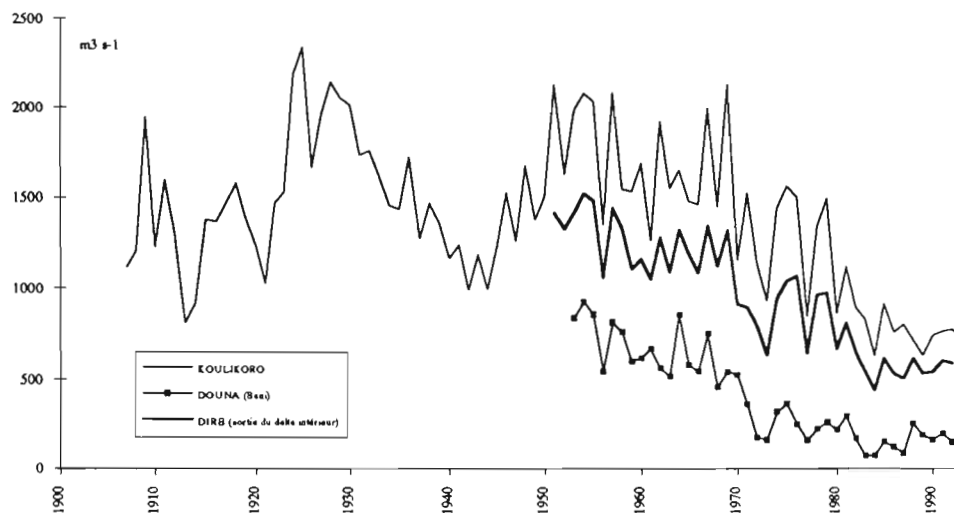


Figure n°7

Evolution des modules annuels, depuis l'origine des observations, du Niger à Koulikoro et Diré et du Bani à Douna

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.

Les lames écoulées moyennes des quatre dernières décennies ont été indiquées dans le tableau 4 en regard des précipitations. Cette tendance persistante à la baisse doit être soulignée car elle montre une dégradation durable du système hydrologique malgré un retour assez sensible à de meilleures conditions de précipitations.

Tableau 4 :
Pluviométrie, lame écoulée et Coefficient d'écoulement du bassin du Niger pendant les quatre dernières décennies.

	1951 -1960	1961 - 1970	1971 - 1980	1981 - 1990
P mm	1649	1527	1403	1315
He mm	472	420	326	218
Ke %	28.6	27.5	23.2	16.6

Le régime hydrologique des fleuves d'Afrique intertropicale est directement influencé par celui des précipitations mais subit aussi, avec un effet retard, l'incidence du cumul de déficits pluviométriques répétés.

Les apports des fleuves de l'Afrique sèche (Sénégal, Gambie...Niger et Bénoué...) totalisent en moyenne 235 km³ an⁻¹ (275 km³ an⁻¹ avec le système Chari, tributaire du lac Tchad). L'appauvrissement de la ressource en eau est pour la décennie 1971-80, de 30 km³ an⁻¹ en Afrique sèche atlantique. Pour la décennie 1981-90, le déficit est de 65 km³ an⁻¹ (Olivry et al, 1993 ; Mahé, 1993).

2.2- La maladie des basses eaux et l'hypertarissement

Le régime naturel des basses eaux sur le Niger à Banankoro et le Bani à Douana est très gravement affecté par la sécheresse actuelle. Les étiages absolus des deux dernières décennies sont systématiquement les plus faibles de la série avec même arrêt complet de l'écoulement sur le Bani. L'évolution de la phase de tarissement constitue le processus majeur responsable de l'appauvrissement des basses eaux.

Après transfert à la station d'observation des écoulements rapides (ruissellements), on observe à partir d'un certain stade de la décrue de l'hydrogramme annuel, une décroissance régulière des débits ou phase de tarissement. Celle-ci correspond à la période où la vidange des nappes souterraines constitue la seule contribution à l'écoulement des cours d'eau de la région.

Pour les cours d'eau tropicaux, cette décroissance des débits suit une loi exponentielle classique :

$$Q_i = Q_0 e^{-\alpha (t_i - t_0)}$$

avec Q_i et Q_0 , débits aux instants t_i et t_0 exprimés en jours et α , coefficient de tarissement dépendant des caractéristiques physiques et géométriques de l'aquifère qui a la dimension de l'inverse d'un temps.

Le tarissement principal, par les volumes qu'il implique et sa représentativité de l'ensemble des aquifères du bassin, constitue une caractéristique importante du régime hydrologique des fleuves soudano-sahéliens. L'étude des coefficients de tarissement montre jusqu'aux années 1972-73 une relative régularité des valeurs.

Les choses changent du tout au tout au cours des années les plus récentes ; on observe alors un véritable bond des valeurs de α (Fig. 8).

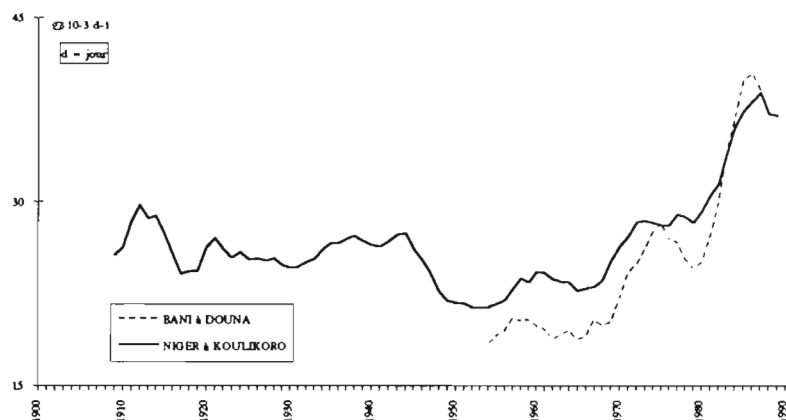


Figure n°8

Evolution des coefficients de tarissement sur le Niger et le Bani.

Ainsi sur le fleuve Niger à Koulikoro (bassin de 120 000 km²), les données montrent un tarissement antérieur à 1975 partagé entre une première période de 40 ans avec un coefficient moyen de 0,026 j⁻¹ et une seconde période "humide" de 20 ans avec un coefficient moyen de 0,023 j⁻¹. Dans la période actuelle, après 8 années à coefficient moyen d'environ 0,028 j⁻¹ on observe une montée brutale dans l'évolution des coefficients de tarissement jusqu'à des valeurs de 0,040 j⁻¹ au début des années 90. Les valeurs récentes ont été déduites de l'étude du Niger à Banankoro qui a conservé son régime naturel.

Dans le cas du Bani, principal affluent du Niger (102 000 km² à Douna), l'évolution du tarissement est tout aussi significative. De 1950 à 1975, le coefficient moyen est de 0,023 j⁻¹ ; il passe à 0,03 j⁻¹ à la fin des années 70 et à 0,04 j⁻¹ à la fin des années 80.

On peut multiplier les exemples dans la région soudano-sahélienne (Sénégal, Chari). On retiendra que le temps nécessaire pour que le débit de tarissement des cours d'eau soudano-sahéliens diminue dans le rapport de 10 à 1 est passé grosso modo de 4 mois à 2 mois (Olivry, 1993 a).

Cette faiblesse quasi générale des étiages traduit un amenuisement croissant des réserves souterraines des bassins fluviaux résultant du cumul des déficits pluviométriques.

2.2.1 Interprétation du fonctionnement des aquifères

La similitude des tarissements observés en milieu intertropical dans les chroniques de débit antérieures à la période de sécheresse doit être soulignée. Les valeurs du coefficient α se situent dans la gamme de 0,015 à 0,025 j⁻¹, en moyenne 0,02 j⁻¹, qu'il s'agisse de grands cours d'eau drainant des bassins de taille très variable ou de petites rivières aux bassins versants très limités, pour autant que les précipitations annuelles dépassent 1000-1100 mm. Les exceptions sont relevées, avec des tarissements plus lents, sur les bassins dont la géologie révèle de larges aquifères continus (nappes de plateaux gréseux : plateau Bateke au Congo, *pro parte* plateaux du Fouta Djallon en Guinée). Des tarissements plus rapides dans les régions moins arrosées traduisent une dégradation des aquifères.

Au Cameroun (Olivry, 1976), une bonne relation a pu être établie entre les variations du coefficient de tarissement moyen (compris entre 0,015 et 0,027 j⁻¹) et celles du coefficient de drainage de différents bassins étudiés. Le coefficient de drainage introduit

la notion de largeur moyenne des interfluves. Des interfluves, on passe naturellement au concept de nappes phréatiques de versant.

L'alimentation des basses eaux des rivières apparaît comme principalement due au cumul des vidanges de petites nappes de versant assez semblables et caractéristiques de la géomorphologie générale de l'Afrique intertropicale. Ceci explique la similitude des tarissements pour des cours d'eau d'importance très variable.

D'après la loi de Darcy, le coefficient de tarissement est directement proportionnel à la conductivité hydraulique (perméabilité), à la porosité, à la surface d'échanges nappe-rivière et inversement proportionnel aux dimensions de l'aquifère. Pour un même bassin, les trois premiers termes ne varient pas ou peu, la surface d'échange nappe-rivière étant davantage liée à la largeur de la section du cours d'eau qu'à son niveau. L'augmentation considérable du coefficient de tarissement dans la période sèche correspond donc essentiellement à une réduction de l'extension des aquifères et donc de la largeur des nappes de versant.

La baisse importante du niveau piézométrique est une constante des observations hydrogéologiques des régions soudano-sahéliennes. L'augmentation considérable de l'épaisseur de la tranche aérée du sol au dessus de la surface piézométrique ne permet pas une réalimentation facile des nappes. Les eaux infiltrées connaissent un long cheminement interstitiel qui n'aboutit pas toujours à la nappe. La zone non saturée peut piéger l'ensemble de la lame d'eau infiltrée de l'année. Celle-ci pourra être reprise par évaporation ou rester en partie en attente d'apports complémentaires des années suivantes. Ceux-ci, s'ils sont assez abondants, et donc que l'on observe de bonnes précipitations, finiront, (effets pistons successifs), par aboutir à une recharge de la nappe.

C'est dans la partie amont de la nappe de versant que l'épaisseur de la zone aérée est la plus grande et donc que les problèmes de réalimentation sont les plus cruciaux. La sécheresse en privant l'aquifère amont des apports de l'infiltration a conduit à une réduction de l'extension de la nappe de versant soit par épuisement des réserves de l'amont, soit par coupure des liaisons entre les aquifères des parties aval et amont. La recharge éventuelle de l'aquifère amont reste dépendante d'un fonctionnement hydrogéologique pluriannuel et, dans la période actuelle, on observe bien un effet mémoire de la sécheresse inscrit dans l'évolution des réserves souterraines.

2.2.2 Les perspectives

Le retour à des débits plus soutenus en saison sèche suppose d'abord la reconstitution des aquifères. Celle-ci ne peut-être immédiate et cela s'est bien vu dans la faible incidence d'une meilleure pluviométrie sur le tarissement. Il n'y a pas concordance entre les variations de l'indice pluviométrique de Lamb et celles du coefficient de tarissement. Du fait même des aquifères, les réactions sont plus lentes dans la restitution des basses-eaux ; elles nécessitent un temps de réponse de plusieurs années et ne sont effectives qu'avec le cumul de variations climatiques de même sens.

A la sécheresse climatique se surimpose avec un décalage pluriannuel une sécheresse spécifique aux cours d'eau qu'on pourrait appeler "sécheresse phréatique". Les lois de l'hydrogéologie sont telles que, dans de bonnes conditions de pluviosité, l'amélioration du régime de basse-eaux pourrait demander un temps comparable à celui qui a conduit à son actuelle dégradation.

Le moteur des évolutions possibles reste bien évidemment l'évolution climatique des prochaines décennies.

Plusieurs scénarios sont possibles :

- poursuite ou aggravation de l'état de sécheresse : les processus mis en évidence sont exacerbés ; les fleuves cesseront assez rapidement d'être pérennes en saison sèche par suite de l'épuisement des réserves. C'est le schéma qui conduit au régime des cours d'eau sahéliens et subdésertiques et, à long terme, aux réseaux hydrographiques fossiles du Sahara.

- apparition d'une longue période humide, comparable en durée à la période déficitaire actuelle : un retour progressif aux basses eaux antérieures est prévisible, avec une abondance retrouvée des ressources en eau dans ces régions au terme de dix ou quinze ans dans le contexte actuel.

- reprise momentanée de la pluviosité excédentaire (moins de dix années consécutives) : on observera une légère amélioration, mais le retour aux basses eaux antérieures sera interrompu par de nouveaux épisodes secs ; de la durée de ceux-ci dépendra l'évolution future du régime des cours d'eau. Alternant avec des épisodes humides, ce scénario conduit à une stabilisation des coefficients de tarissement à un niveau supérieur à celui observé lors des décennies antérieures à 1975, et donc à un appauvrissement durable des ressources de saison sèche.

Sans s'attarder aux conséquences du scénario le plus pessimiste, il convient de souligner que l'occurrence d'une situation climatique médiane conduit à pérenniser la dégradation du régime hydrologique des fleuves de la région et que dans la perspective la plus optimiste, les effets de l'actuelle sécheresse se feront encore sentir pendant plusieurs années (Olivry et al, 1992).

Le déficit d'alimentation des fleuves par les nappes souterraines, apparent en saison sèche et étudié ici, est bien entendu sous-jacent en période de crue et ceci explique aussi la faible hydraulicité et les modestes maximums de crue que l'on continue d'observer malgré une certaine reprise de la pluviosité.

2.3. Evolution de la puissance des maximums de crue annuels

Sur la base du calcul du coefficient de crue défini par P. Myer, A. Coutagne et M. Pardé ($A : Q / S^{0,5}$ en $m^3 s^{-1} km^{-2}$ où Q est le débit et S l'aire du bassin versant), les valeurs extrêmes des maximums annuels de crue ont des coefficients de 28 à 6 pour le Niger, 35 à 4 pour le Bani, 20 à 2 pour le Sénégal, ce qui traduit la médiocrité de la puissance des crues en Afrique tropicale.

Au cours des deux dernières décennies, l'affaiblissement de la puissance des crues n'a fait que s'accroître ; par rapport aux valeurs moyennes, les coefficients de crue ont été divisés par 2,2 sur le Niger, 4 sur le Bani, 5 sur le Sénégal.

Les chroniques de débits maximums annuels du Niger à Koulikoro et du Sénégal à Bakel montrent des variations globalement très voisines (Fig. 9).

Pour l'Afrique soudano-sahélienne de l'Ouest, la baisse des maximums de crue paraît intervenir dès 1968 pour le Sénégal après une séquence de fortes crues pratiquement continue depuis 1950 ; la tendance s'accroît dans les années 72 et 73, années où elle apparaît sur le Niger, le Bani et l'ensemble des cours d'eau de la région. Une reprise en 1974 et 1975 laisse supposer un temps que l'épisode déficitaire est comparable à ceux

déjà observés dans le siècle en 1913 et au début des années 40, mais la tendance à la baisse reprend dès 1976 attestant d'un phénomène climatique majeur dans les années qui suivent. Le creux de la vague paraît atteint dans les années 1983, 84 mais l'évolution ultérieure montre globalement une stagnation de l'amplitude des crues.

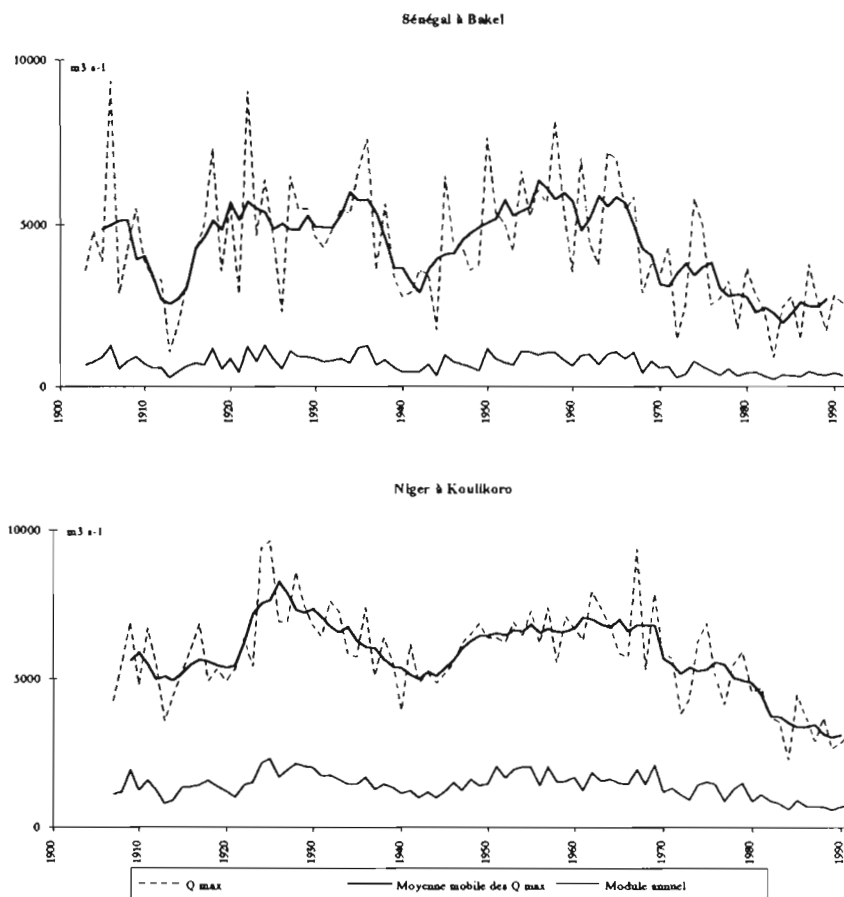


Figure n° 9

Variations des débits maximums de crue et des modules pour le Sénégal et le Niger (en trait fort, moyenne mobile sur 5 ans des Qmax).

Sur le plan statistique, le Niger montre sur les 25 dernières années, 19 années à maximum inférieur à la médiane ; pour les onze dernières années, dix ont un maximum inférieur à la valeur décennale sèche.

Par opposition à l'étude des étiages ou de l'écoulement annuel pour lesquels l'évaluation du risque se situe en termes de potentialités des ressources en eau, les études de prédétermination des crues s'intéressent principalement à l'évaluation du risque de fortes crues ; cependant pour nombre d'hydrosystèmes où la crue annuelle est, avec l'inondation de plaines, promesse de cultures de décrue ou de ressources halieutiques, l'analyse statistique des événements de période sèche est tout aussi importante. La tentation est forte, en parlant de rupture climatique, de traiter deux populations différentes : avant et depuis la "grande sécheresse". La comparaison des prédéterminations ajustées aux différentes séries de valeurs (série complète, série antérieure à 1970, série de 1971 à 1992) montre, pour la seule période actuelle, une sous-estimation pour les crues exceptionnelles de 24% pour le Niger. Bien évidemment, pour ce qui est de la prévision des faibles crues, la série actualisée à 1992 donne des valeurs nettement inférieures à celle qui s'arrête en 1970. (Tableau 5)

Tableau 5

Etude fréquentielle des maximums annuels du Niger à Koulikoro pour différentes périodes

Echantillon Statistique	Période de retour sèche (ans)				Médiane	Période de retour humide (ans)			
	100	50	20	10		2	10	20	50
1907 1992	2260	2680	3300	3800	5590	7735	8290	8910	9330
1907 1970	3400	3730	4240	4690	6290	7880	8330	8840	9180
1971 1992	1340	1680	2200	2660	4280	5900	6360	6870	7220

La comparaison des hydrogrammes de crue des différents fleuves étudiés montre dans la période actuelle deux types de situation :

- un hydrogramme tronqué sans maximum nettement affirmé correspondant à une saison des pluies normale en durée mais très déficitaire au coeur de la saison.
- un hydrogramme réduit en durée correspondant à une saison des pluies tardive ou écourtée.

Dans les deux cas, le volume de la crue et le maximum sont faibles.

Les coefficients de pointe, évalués ici comme le rapport du débit maximum au module annuel, montrent que la tendance générale de la période actuelle est caractérisée par des hydrogrammes de crue plus étroits. Ainsi par rapport à la moyenne de ce coefficient calculé sur les 40 dernières années, on observe des coefficients moyens qui augmentent sur les deux dernières décennies. On passe sur le Niger de 3,8 à 4,9.

La mise en régression des variables, modules/maximum annuel sur l'ensemble de la période d'observation, avec deux séries bien individualisées (avant et après 1970) aboutit à de bonnes relations globales (Fig. 10).

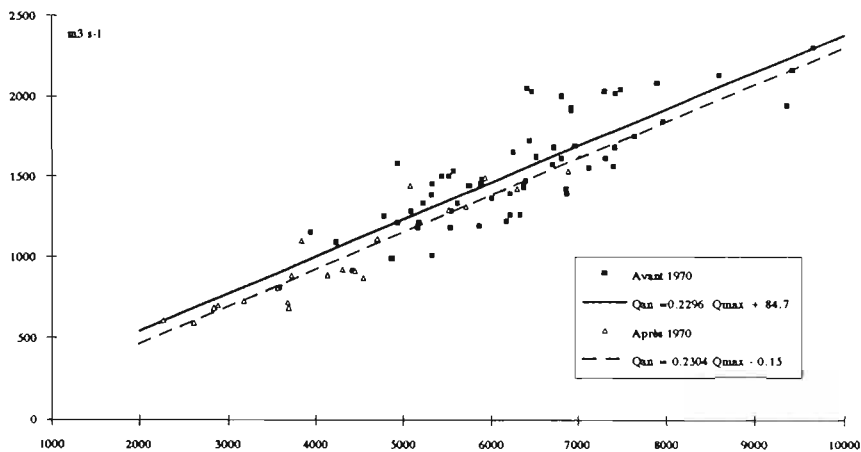


Figure n° 10

Relations des modules annuels en fonction des Q_{MAX}

La persistance de faibles maximums annuels malgré un certain retour à de meilleures conditions de pluviosité constitue un fait d'observation pour l'ensemble de la sous-région (Olivry, 1993 b).

On constate notamment que pour des saisons des pluies équivalentes le maximum de crue de la période actuelle reste nettement plus faible que dans le passé. Ainsi, sur le bassin du Niger, les précipitations se sont rapprochées de la normale en 1991 pour la

plus grande satisfaction des populations rurales dont les cultures pluviales ont été de bon niveau, mais le fleuve lui-même n'a pas marqué de réaction très sensible.

La même année, des études du ruissellement sur petits bassins représentatifs au Mali ont permis d'observer quelques événements pluviométriques journaliers intenses, dont certains de fréquence décennale, et des conditions générales de genèse des crues sans modification significative par rapport aux observations effectuées une trentaine d'années auparavant (Joignerez et Olivry, 1992). Ces observations rejoignent les conclusions de nombreux auteurs. Il arrive même parfois en zone soudano-sahélienne que la dégradation du milieu ait entraîné de meilleures conditions de ruissellement et des débits de pointe de crue plus élevés pour le même type d'averse. A l'échelle de grands bassins, dans de mêmes conditions pluviométriques, la contribution à l'hydrogramme de crue des écoulements rapides (ruissellement et écoulement hypodermique) sera identique.

La persistance de l'amointrissement de la puissance des crues doit être recherchée dans une contribution réduite des apports d'origine souterraine.

Ceci nous ramène aux observations effectuées sur le tarissement principal de ces grands fleuves. La part de cet écoulement de base est difficile à chiffrer sur les grands bassins ; elle est probablement plus importante qu'on ne l'imaginait, mais a considérablement diminué dans la période actuelle. On a reconstitué le schéma théorique de composition de ces écoulements pour deux hydrogrammes de crue correspondant aux périodes étudiées et à des conditions pluviométriques identiques. Le volume "ruisselé" est le même ; le volume d'origine phréatique ("écoulement de base") est déduit de la courbe du tarissement principal. Les hydrogrammes montrent un maximum de crue nettement plus faible dans la situation actuelle (Fig. 11). Un retour à la normale nécessitera une reconstitution des aquifères superficiels qui suppose plusieurs années consécutives de bonnes précipitations.

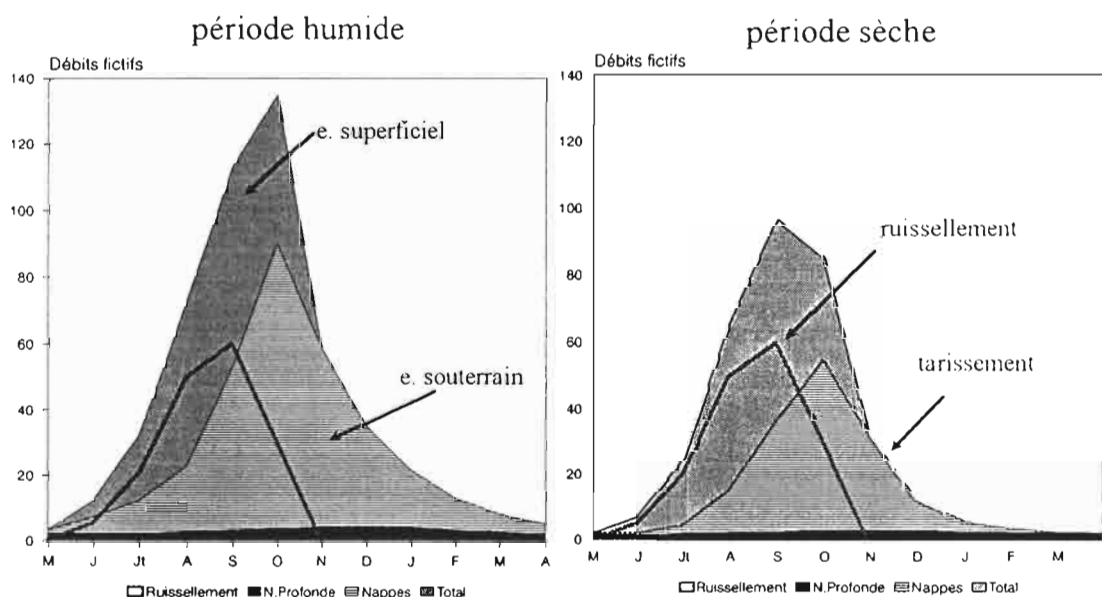


Figure n° 11

Schéma théorique de décomposition de l'hydrogramme de crue pour les périodes sèche et humide.

Le régime déficitaire des précipitations de la période actuelle est bien évidemment responsable de la baisse de puissance des crues. Il a d'abord un effet immédiat, avec des crues réduites en puissance et (ou) en durée suivant la saison des pluies. Il a ensuite un effet mémoire avec le cumul de déficits des années antérieures et des apports réduits des

nappes phréatiques. On doit donc s'attendre à une certaine persistance des faibles maximums de crue même dans l'éventualité d'un retour à une séquence humide.

2.4. - Conclusions

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".

Pour revenir au cadre plus étroit de cette étude, aux régions soudano-sahéliennes et aux "fleuves malades de l'Afrique sèche", il semble qu'un minimum de dix années de bonnes conditions climatiques soit nécessaire pour cette "normalisation". Dans l'attente d'un changement climatique favorable, l'appauvrissement des ressources en eau de l'Afrique sèche a donc toutes chances de rester une constante de l'hydrologie régionale jusqu'à la fin du XXème siècle.

BIBLIOGRAPHIE

- 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.
- CARBONNEL J.P. et HUBERT P. (1985) Sur la sécheresse au Sahel d'Afrique de l'ouest. Une rupture climatique dans les séries pluviométriques du Burkina Faso (ex. Haute Volta). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, t; 301, série II, n° 13, pp. 941 - 944.
- JOIGNEREZ A. et OLIVRY J.C. (1992) Régionalisation des écoulements non pérennes sur petits bassins au Mali. In Colloques et Séminaires ORSTOM. VIIIèmes Journées hydrologiques de Montpellier Sept 1992.
- LAMB, P. (1985) Rainfall in subsaharian West Africa during 1941-83. *Zeit. Gletscherk Glazialgeologie*, 21 : 131-139.
- MAHE G. (1993) Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle. Analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. *coll. Etudes et Thèses*. ORSTOM Paris. 438 p.
- NICHOLSON S.E., KIM J & HOOPINGARNER J. (1988) Atlas of African rainfall and its interannual variability. *Departement of Meteorology, Florida State University Tallahassee, Florida USA*.
- OLIVRY J.C. (1976) Régimes hydrologiques en pays bamiléké (Cameroun). *Cahiers ORSTOM Paris, série hydrologie, Vol. XIII, n° 1, pp. 37 - 71.*

- OLIVRY J.C. (1983) Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégal et aux Iles du Cap-Vert. Examen de quelques séries de longue durée (débits et précipitations). Cahiers ORSTOM, Paris, Vol. XX, n°1, pp. 47 - 70
- OLIVRY J.C. (1987) Les conséquences durables de la sécheresse actuelle sur l'écoulement du fleuve Sénégal et l'hypersalinisation de la basse Casamance. (*Proc. Vancouver Symp. Août 1987*) 501-512, *IAHS Publ. no168*.
- OLIVRY J.C., SIRCOULON J. et TOURE M. (1992) The ill rivers of Africa. in Colloque ICID Impactos de variacoes climaticas e desenvolvimento sustentavel em regioes semi-aridos. Fortaleza (Brazil).
- OLIVRY J.C., BRICQUET J.P. et MAHE G. (1993) Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide ? In Hydrology of warm humid regions (J.S Gladwell Ed. Sci.). *Proc. Yokohama Symp. Juillet 1993*. 67-78. *IAHS Publ. n° 216*.
- OLIVRY J.C. (1993a) Evolution récente des régimes hydrologiques en Afrique intertropicale. In "l'eau, la terre et les hommes, hommage à René Frécaut". Madeleine Griselin Ed. Presses Universitaires de Nancy. pp. 181 - 190.
- OLIVRY J.C. (1993b) De l'évolution de la puissance des crues des grands cours d'eau intertropicaux d'Afrique depuis deux décennies. in Journées hydrologiques de Grenoble ; Centenaire Maurice Pardé ; 22/24 Septembre 1993.
- PARDE M. (1933) Fleuves et rivières. 5ème édition. *Lib. A. COLIN*. 241 p. PARIS
- SIRCOULON J. (1987) Variation de débits des cours d'eau et des niveaux des lacs en Afrique de l'ouest depuis le début du 20ème siècle. (*Proc. Vancouver Symp. Août 1987*) 13 - 25, *IAHS Publ. no168*.
- SIRCOULON J. (1989) Bilan hydropluviométriques de la sécheresse 1968 - 84 au Sahel et comparaison avec les sécheresses des années 1910 à 1916 et 1940 à 1949. in "Les hommes face aux sécheresses". Nordeste brésilien. Sahel africain. Coll. Travaux et Mémoires de l'**IHEAL** numéro 42, pp. 107 - 114.

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

J. C. OLIVRY

RESUME :

La cuvette lacustre du Niger, et son delta intérieur, constitue un hydrosystème particulier caractérisé par ses nombreux effluents, lacs et plaines d'inondation d'une part et par des conditions climatiques sahéliennes et semi arides d'autre part. Les chroniques des apports amont et des sorties aval du delta intérieur montrent que les pertes annuelles, dues essentiellement à l'évaporation, varient de 40 km^3 à 6 km^3 , soit 47% des entrées en période humide et seulement 32% en période sèche, du fait de la réduction des zones inondées. La recherche d'un modèle de l'extension spatio-temporelle de l'inondation dans le delta intérieur conduit à estimer que le maximum annuel des surfaces inondées varie de $35\,000 \text{ km}^2$ en période humide à $7\,000 \text{ km}^2$ en période sèche.

ABSTRACT : Hydrology of the inner delta of the Niger river.

The inner delta of the Niger river is a particular system submitted to sahelian and subdesertic climatic conditions and 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 km^3 to 6 km^3 . 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. The surface of the flooded area is inferred from the hydrological balance. The modelization of the spatiotemporal extension of the filling of the inner delta show that the flooded areas vary between $35\,000 \text{ km}^2$ in wet period and $7\,000 \text{ km}^2$ in dry period.

INTRODUCTION

Vaste zone d'épandage des apports du Niger, la cuvette lacustre constituée par un delta intérieur inondable et un système complexe de lacs en rive droite et rive gauche couvre une superficie de plus de 50.000 km^2 suivant un rectangle orienté SW.NE de 450 km de longueur sur 125 km de largeur (Fig. 1).

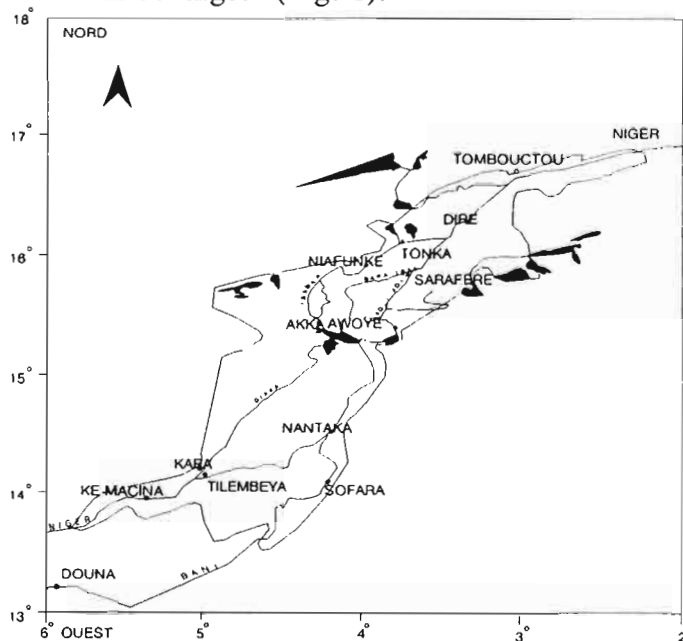


Figure n° 1
Carte de situation de la Cuvette lacustre

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).

1 ELEMENTS DU REGIME HYDROLOGIQUE DANS LA CUVETTE LACUSTRE

Sur le plan des **conditions climatiques**, la station de Mopti a une situation géographique représentative du sud et du centre de la cuvette lacustre ; la station de Tombouctou caractérise le nord de la cuvette. Les paramètres pris en compte sont la température et l'humidité relative (Fig. 2 et 3).

Le régime des précipitations correspond pour la partie sud du Delta central au **régime sahélien** ; le nord de la cuvette est soumis au **régime subdésertique**. Les moyennes actualisées font apparaître sur l'ensemble de la région une baisse vers le sud des précipitations de 120 à 150 mm par rapport aux moyennes antérieures à la sécheresse. Ainsi la hauteur de précipitation interannuelle est passée à Mopti de 535 mm à 415 mm. La chronique des précipitations de Mopti, San, Djenné, Ké-Macina, Diré et Tombouctou a été reproduite dans la figure 4.

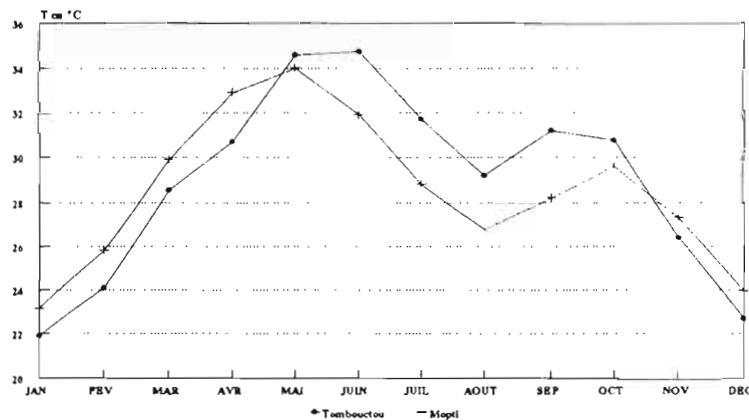


Figure n° 2

Variation saisonnière des températures moyennes mensuelles (T) à Mopti et Tombouctou.

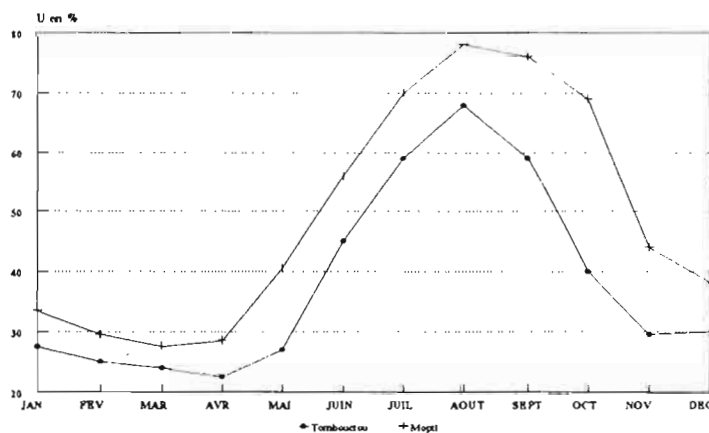


Figure n° 3

Variation saisonnière de l'humidité relative moyenne mensuelle (U) à Mopti et Tombouctou.

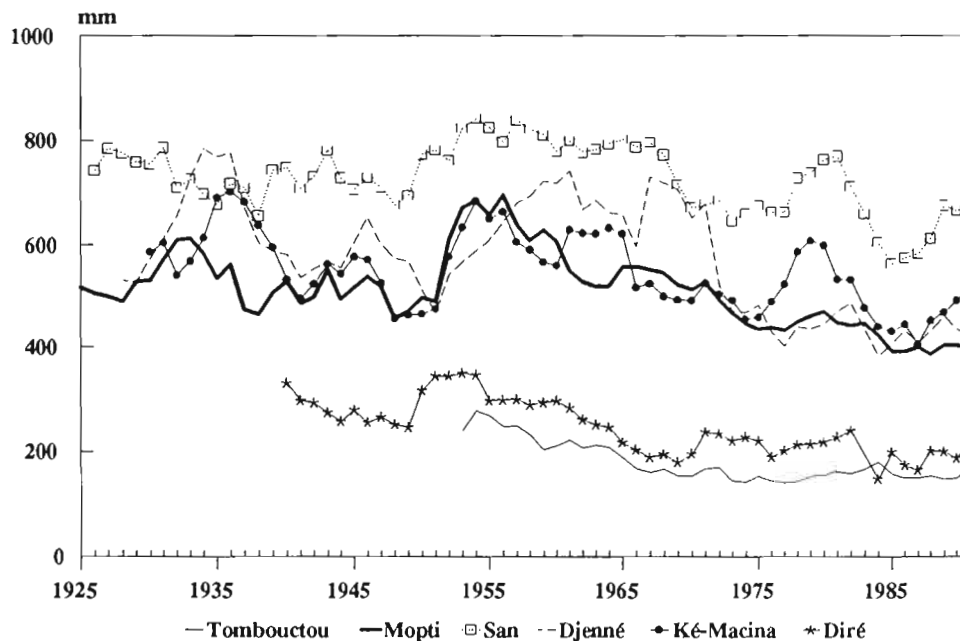


Figure n° 4

Evolution des hauteurs de précipitations annuelles relevées depuis l'origine des observations sur différentes stations de la cuvette lacustre. (Les valeurs ont été lissées par calcul de la moyenne mobile sur 5 ans).

Les écoulements dans la cuvette lacustre s'organisent autour d'un réseau hydrographique complexe d'effluents, défluent et lacs qui ont été décrits par ailleurs. Nous rappelons ci-après les principaux axes d'écoulement (Brunet - Moret et al, 1986; Gallais, 1967).

1) Delta amont et central en aval de Ké-Macina pour le Niger, de Douna pour le Bani avec constitution de deux branches majeures.

a) le bras principal du Niger qui transite du sud au nord-est jusqu'à Mopti où il reçoit le Bani puis rejoint le Lac Débo.

b) le bras secondaire du Diaka, effluent du Niger au niveau de Diafarabé ; mesuré à Kara, son débit annuel correspond au tiers du débit du Niger à Ké-Macina. Il rejoint le lac Débo après la traversée du Walado.

Des effluents d'importance moindre en rive gauche du Niger entre Tilembeya et Mopti ramènent à travers la partie centrale du delta une partie non négligeable des écoulements vers le Diaka. En rive gauche du Bani, d'autres effluents rejoignent le Niger à travers le complexe Djenné - Kouakourou, ce qui explique les pertes importantes du Bani entre Douna et Sofara.

2) Cuvette nord, du Lac Débo à Diré avec trois axes drainants principaux :

a) l'Issa Ber, branche majeure à l'ouest qui assure le transfert de 80% à 87% des sorties du lac Débo, respectivement en périodes humide et sèche. La station de référence est celle d'Akka. Il alimente le système lacustre de rive gauche (région de Léré et lacs Fati et Horo).

b) Le Bara Issa concerné par 10% à 12% des écoulements suivant l'hydraulicité faible ou forte du Niger. Les débits sont mesurés à Awoye. Il rejoint l'Issa Ber en amont de Diré.

c) le Kolikoli, le plus petit défluent du Lac Débo exporte de 3 à 10% des sorties du Lac Débo, vers le Lac Korientzé, avant de rejoindre le Bara Issa à Saraféré.

Le Bara Issa et le Kolikoli alimentent, dans de bonnes conditions d'hydraulicité, le vaste système lacustre de rive droite (des lacs Korarou aux lacs Nangaye, Garou, Hariboma etc...)

3) *L'extrémité nord de la cuvette lacustre, de Diré à Korioumé* (Tombouctou) est surtout marquée par l'effluent du marigot de Goundam alimentant le système lacustre Télé-Faguibine. Le Niger a atteint alors son parcours ultime vers le Nord et aborde la boucle du Niger avec le contrôle hydrologique du seuil de Tossaye. De Ké-Macina à Diré, le Niger a parcouru environ 550 km et perdu seulement 12 m d'altitude, soit une pente moyenne de 2,2 cm par kilomètre.

La pente superficielle du Niger en hautes-eaux est de l'ordre de 2 cm km⁻¹ entre Mopti et Niafouké mais tombe à 1 cm km⁻¹ de Niafouké à Diré. En amont du Lac Débo, elle atteint 3 cm km⁻¹ (Lamagat et al, 1983 ; Guiguen, 1985).

Ces faibles pentes entraînent des vitesses maximales du courant en surface n'excédant pas 0,3 à 0,6 m.s⁻¹ dans les bras principaux. Les conditions hydrauliques rendent particulièrement délicates les mesures de débit et évaluations des circulations d'eau dans le Delta Central, surtout au niveau d'effluents secondaires où les vitesses sont souvent imperceptibles.

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 a 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.

Tableau 1 :

Exemples de variation des modules, de Koulikoro à Tossaye, pour trois années-type (m³.s⁻¹).

Station	Année humide (1954)	Année moyenne (1968)	Année sèche (1985)
Koulikoro	2075	1445	915
Ke 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

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 5 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. La figure 6 montre cet étalement des hydrogrammes, établis à partir des débits mensuels : amortissement dans le temps et décalage du maximum vers l'aval. Pour

des sections hydrauliques assez comparables, l'amplitude des hauteurs maximales de crues décennales sèche et humide est d'environ 100 cm pour les stations de Ké-Macina, Mopti et Diré, pour des amplitudes de débit correspondantes de 1700, 1000 et 700 m³ s⁻¹. Le maximum de crue médian (Q_{MAX}) a été évalué à 5600 m³ s⁻¹ pour Ké-Macina, 1600 m³ s⁻¹ pour le Diaka à Kara, 3300 m³ s⁻¹ pour le Niger à Mopti et 2300 m³ s⁻¹ pour le Niger à Diré. Les rapports Q_{MAX}/Module passent respectivement de 4,7 à 4, puis 2,9 et 2,3 pour ces quatre stations.

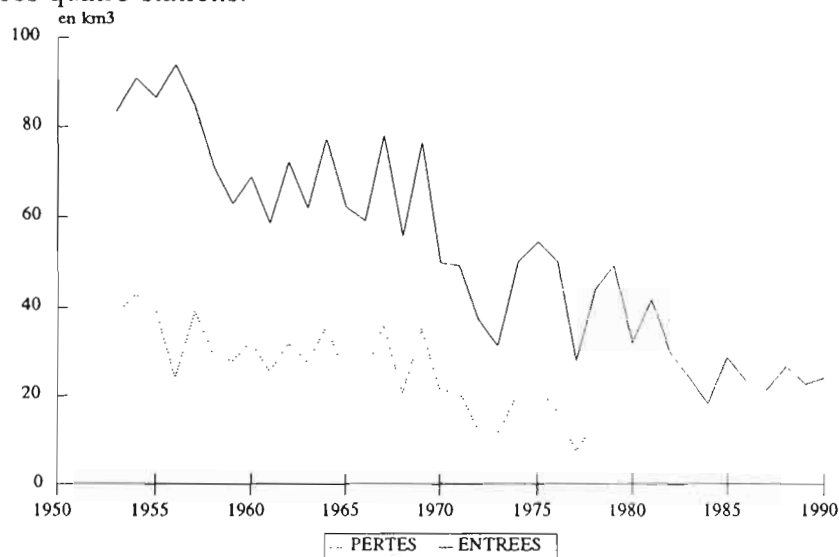


Figure n°5

Evolution des volumes des apports annuels du bassin supérieur en milliards de m³ (km³) mesurés sur Ké-Macina et Douna et pertes correspondantes à l'aval du Delta Central (Diré).

Le temps de propagation de l'onde de crue est très variable ; il est d'autant plus long que le maximum de crue est important mais il n'est pas possible d'établir de relation précise. La propagation du maximum de crue est d'autant plus lente que l'inondation et les débordements deviennent importants. Entre les crues minimales et maximales, le transfert de l'onde de crue peut varier de 18 jours à 78 jours entre Ké-Macina et Diré. Sur les trois tronçons principaux, Ké-Macina - Mopti (Nantaka), Nantaka - Akka et Akka - Diré, l'onde de crue est la plus lente sur le tronçon Mopti - Akka. Précisons qu'on ne doit pas confondre vitesse de l'onde de crue et vitesse du courant. Les dates d'apparition du maximum de crue sont également très variables : en moyenne 1er octobre à Ké-Macina, 24 octobre à Mopti - Nantaka et 4 janvier à Diré. Cette grande variabilité explique l'extrême complexité d'une modélisation de l'inondation dans le Delta Central.

2 - COMPARAISON DES CONDITIONS HYDROLOGIQUES DANS LE DELTA EN PERIODE HUMIDE ET EN PERIODE SECHE

Deux périodes de cinq ans ont été prises en compte ; l'une, de 1962 à 1966, se situe pendant le "cycle" humide du Niger sans en exprimer les valeurs maximales ; l'autre, de 1982 à 1986 est largement déficitaire et comprend l'année la plus déficitaire de la série (1984). La comparaison est faite entre les moyennes de ces deux périodes afin de mettre en évidence les grandes lignes de l'évolution du fonctionnement hydrologique dans le Delta central. L'information a été traitée au pas de temps mensuel pour l'ensemble de l'information hydrologique ; les volumes sont exprimés en km³. La comparaison entre

les années humides (H) et sèches (S) est proposée dans un certain nombre de figures (6, 7, 8 et 9).

Au niveau des entrées, le fait le plus caractéristique tient dans un appauvrissement des ressources en eau beaucoup plus marqué sur le Bani que sur le Niger : les modules du Bani sont dans le rapport de 5,3, contre 2,2 pour ceux du Niger. En période humide, le débit mensuel maximum est celui du mois d'octobre pour le Bani et le Niger ; en période sèche, les deux cours d'eau ont leur débit maximum mensuel en septembre, à un niveau évidemment beaucoup moins élevé. Cette pseudoprécocité de la crue correspond en fait à un hydrogramme de crue tronqué en volume et en temps par les effets de la sécheresse (figure 6). Les écoulements annuels de Diré et Tossaye montrent entre périodes humide (H) et sèche (S) des rapports respectifs de 2,14 et 2,10, somme toute très voisins du rapport du Niger à Ké-Macina. Le décalage entre les débits mensuels de crue est plus important puisqu'il passe respectivement pour Diré et Tossaye de décembre et janvier (H) à octobre et novembre (S).

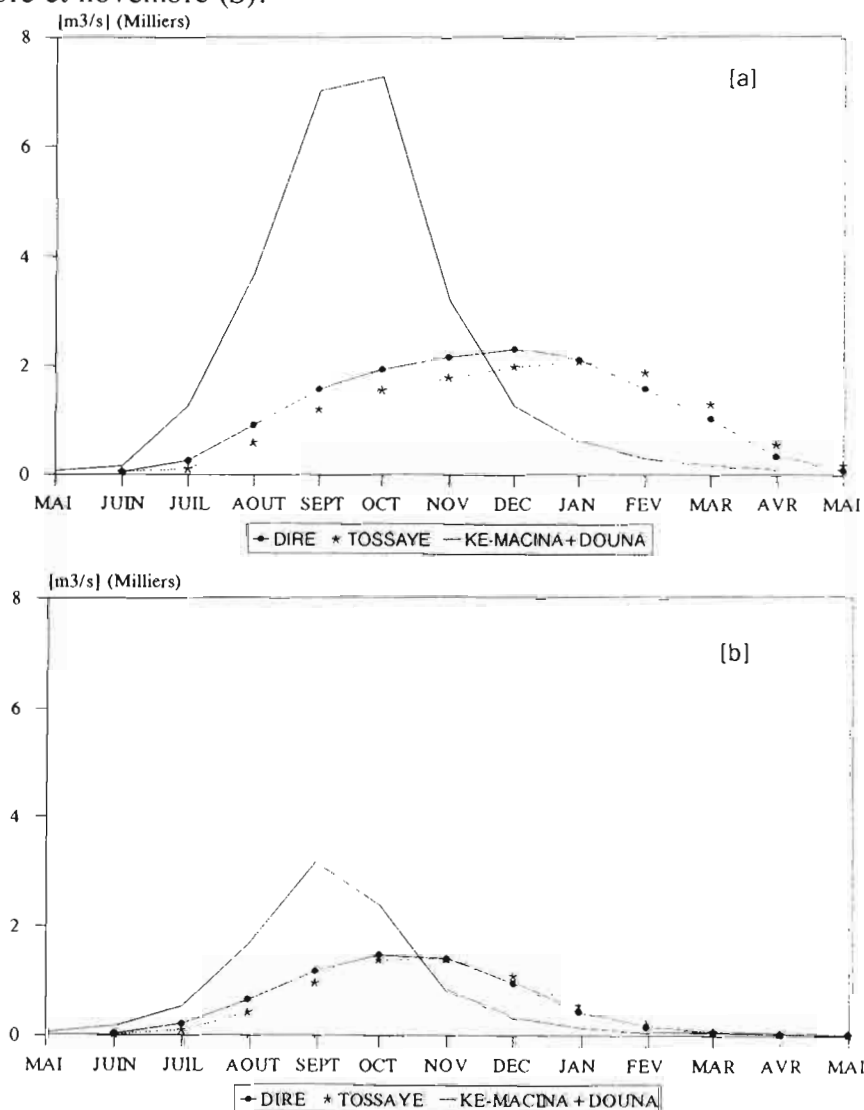


Figure n° 6

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

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. Entre

Diré et Tossaye, les pertes sont beaucoup plus réduites : près de 3 km³ en période humide, 1 km³ en période sèche (rapport de 3). Il est important de souligner que le rapport de 4 exprimant la diminution des pertes dans le Delta Central traduit aussi la diminution de l'extension spatio-temporelle de l'inondation.

Le bilan des "pertes" au pas de temps mensuel a été reproduit dans les figures 7 et 8. On distingue une première période de progression de l'inondation avec des pertes correspondant à l'infiltration, à l'évaporation et surtout à un stockage de volumes importants dans les plaines d'inondation. Cette première période atteint son maximum en septembre et octobre pour les années humides (14 km³ au mois d'octobre) et en septembre pour les années sèches, avec un peu moins de 5 km³ de pertes. Le piégeage des eaux diminue rapidement en novembre (H) et octobre (S) et puis une période de restitution partielle des volumes piégés apparaît. C'est la vidange des plaines d'inondation. En années humides, les mois de très forte restitution sont ceux de décembre, janvier, février avec un maximum en janvier de l'ordre de 3,4 km³. La restitution est plus précoce mais beaucoup plus faible en années sèches : autour de 1 km³ en novembre et décembre. Ce déstockage ne concerne évidemment que les zones d'inondation en liaison avec le réseau hydrographique ; il y a progressivement coupure entre certaines zones basses ou mares et le fleuve, les volumes résiduels passant dans le bilan évaporatoire de la région. L'évolution très contrastée en périodes sèche et humide de cette phase de décrue constitue sans doute l'explication majeure de l'évolution de la production halieutique (Laé, 1992).

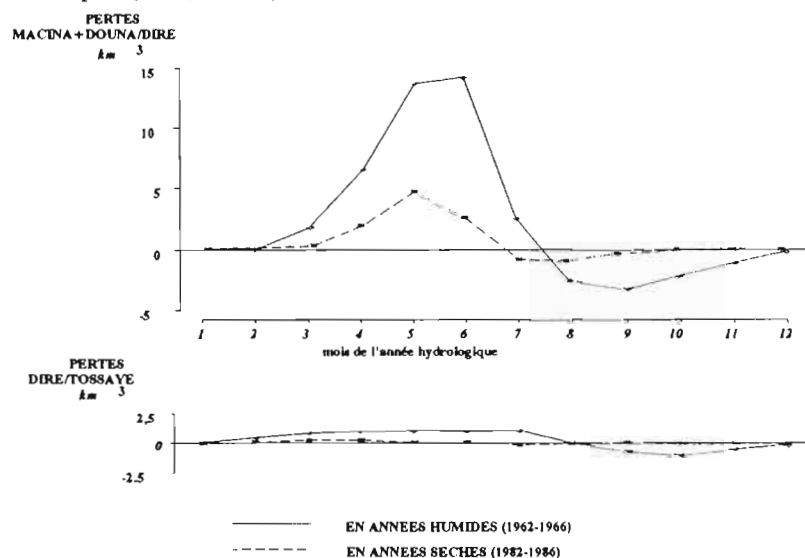


Figure n° 7

Variation moyenne mensuelle du volume des pertes entre Ké-Macina - Douna et Diré et entre Diré et Tossaye pour des périodes humides (1962 - 66) et sèches (1982 - 86), en milliards de m³ (km³). Les valeurs négatives correspondent à une restitution dans le réseau hydrographique de volumes stockés dans les plaines d'inondation. Le mois 1 de l'année hydrologique est le mois de mai.

La figure 9 met en relation le volume mensuel des pertes ou restitutions entre les entrées et Diré et le débit des entrées à Ké-Macina et Douna. L'indication des mois de l'année hydrologique permet de suivre l'évolution du fonctionnement du Delta. On observe bien, pour les deux séries d'années, le même type de courbe en boucle passant par la phase de restitution mais la différence d'amplitude des deux périodes est particulièrement frappante.

L'évapotranspiration sur nappe d'eau libre a été estimée à partir des évapotranspirations potentielles calculées par la formule de Penman sur les stations de

Mopti et de Tombouctou affectées respectivement d'une pondération spatiale de 0,67 et de 0,33. La différence entre années humides (1962-66) et sèches (1982-86) est à peine significative à l'échelle de l'année, avec des valeurs moyennes de 2260 mm et 2360 mm. Les évaporations des mois de forte inondation sont notamment très voisines (Pouyaud, 1986).

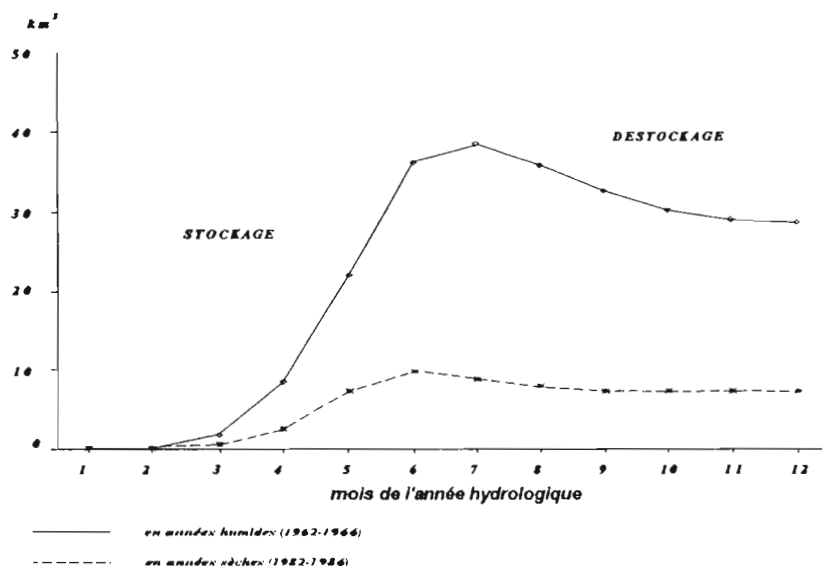


Figure n° 8
Courbes cumulées moyennes des pertes mensuelles à Diré en km^3 pour les périodes humides (1962 - 1966) et sèches (1982 - 1986).

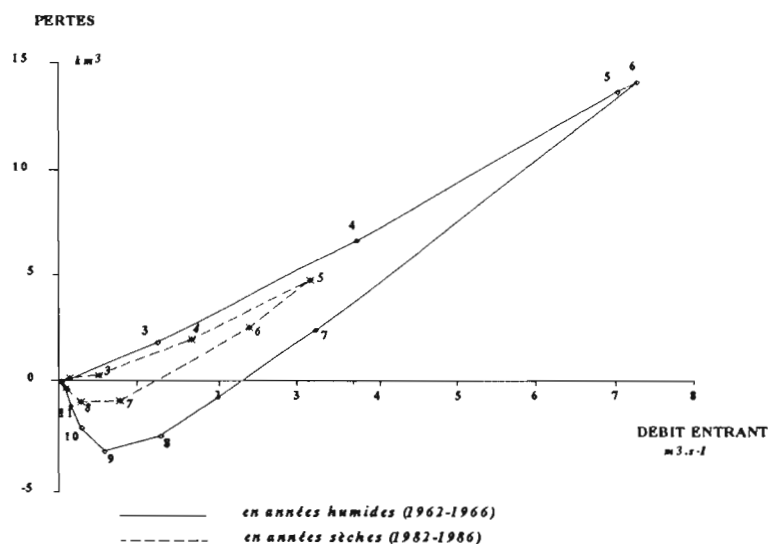


Figure n° 9
Relations entre les pertes moyennes mensuelles observées à Diré (km^3) et les débits entrés de Ké-Macina et Douana en années humides (1962-1966) et sèches (1982-1986). Le mois 6 est le mois d'octobre.

Pour les mêmes périodes, les hauteurs moyennes de précipitations mensuelles ont été calculées à partir des relevés de neuf stations de la Cuvette (Ké-Macina, San, Tenenkou, Sofara, Mopti, Sah, Saraféré, Niafouké, Diré). Le total annuel pour la période humide considérée est de 490 mm et de 330 mm pour la période sèche. Le total mensuel d'août est le plus affecté dans la période sèche considérée (moitié de la valeur de la période humide) (tableau 2).

Tableau 2 :
Précipitations et évaporation sur nappe d'eau libre dans
le Delta Central du Niger en période humide (H) et sèche (S)

en mm	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Année
P _H	17	58	94	190	92	26	0	3	1	0	4	6	490
P _S	13	50	92	97	65	8	2	0	0	0	0	3	330
E _{nl} H	220	210	200	160	165	185	180	160	165	185	210	220	2260
E _{nl} S	240	220	210	180	170	195	180	160	170	190	215	230	2360

3 EVALUATION DES SUPERFICIES INONDEES DANS LE DELTA INTERIEUR

Le suivi saisonnier des pertes entre les débits d'entrée dans le delta intérieur et le débit de sortie à Diré a mis en évidence des phénomènes de stockage puis de restitution de volumes importants dans les zones d'inondation ; le bilan annuel des pertes est un bon indicateur de l'extension de l'inondation, les pertes étant pour l'essentiel consommées par évaporation. Dans le bilan hydrologique du Delta central interviennent aussi les précipitations et l'infiltration. Des études antérieures ont montré qu'à la transition de fin de saison sèche, les pertes étaient négligeables dans le bilan, ce qui signifie que l'infiltration - et l'alimentation des aquifères - s'effectue principalement par l'intermédiaire des surfaces inondées. Seules les précipitations reçues par le système en eau participent au bilan ; infiltration et reprise par évaporation des précipitations, absence de ruissellement significatif sur les zones hors d'eau excluent celles-ci du bilan.

Le bilan hydrologique peut se résumer par les équations suivantes dans lesquelles les différents termes sont ramenés à des volumes :

$$\text{PERTES (}\nabla V) = \text{DEBIT AMONT (}V_m) - \text{DEBIT AVAL (}V_v)$$

$$\text{PERTES (}\nabla V) = (\text{EVAPORATION (}E) + \text{INFILTRATION (}I) + \text{STOCKAGE (inondation) (}St)) - (\text{PRECIPITATIONS (}P) + \text{AUTRES APPORTS RUISSELES (}r) + \text{RESTITUTION (}R_s))$$

Trois périodes principales :

1°) montée des eaux

$$\begin{aligned} \text{Pertes positives} &= E + I + St - P - r - R_s \\ &\quad r \text{ et } R_s \text{ négligeables} \\ &= E + I + St - P \\ &\quad \text{St est le terme principal} \end{aligned}$$

2°) maximum de la crue

$$\begin{aligned} \text{Pertes} &= E + I + St - R_s \\ \text{étale de l'inondation } St &= R_s \\ \text{PERTES} &\# \text{EVAPORATION} \end{aligned}$$

3°) décrue

$$\text{Pertes négatives} = E + I - R_s$$

BILAN ANNUEL

$$\begin{aligned} \text{Pertes} &= E + I + dSt - P \\ \text{par hypothèse } I &= P, \text{ sauf pour années très humides, } dSt \text{ est négligeable} \end{aligned}$$

$$\text{d'où Pertes} = E$$

Dans l'évaluation proposée ici, on supposera que les termes infiltration et précipitation sur les surfaces en eau sont du même ordre de grandeur ; les précipitations compensent l'infiltration **dans le bilan annuel** et les pertes totales peuvent être assimilées au bilan évaporatoire des zones inondées.

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

($V_{m(n)} - V_{v(n+1)}$) et la date d'apparition du maximum à Mopti permettent de déterminer la perte mensuelle, centrée sur l'instant t_{max} , due à l'évaporation et d'estimer la surface maximale d'inondation correspondante (S) ($S = \frac{V}{E}$).

L'estimation des surfaces d'inondation des mois encadrant le maximum mensuel d'inondation est obtenue à partir d'une évaluation par approximations successives des pertes mensuelles par évaporation, basée sur la progression de la montée des eaux puis de la décrue et de telle sorte que le bilan annuel de l'évaporation corresponde aux pertes hydrologiques. (figure 10). Mois par mois, les surfaces d'inondation sont alors déduites des valeurs respectives de l'évaporation mensuelle du tableau 2. Le tableau 3 résume les résultats de cette analyse du maximum d'inondation pour trois années-type. Le modèle a été appliqué à l'ensemble de la chronique disponible pour estimer chaque année les surfaces du mois d'inondation maximale. La figure 11 reproduit cette nouvelle chronique.

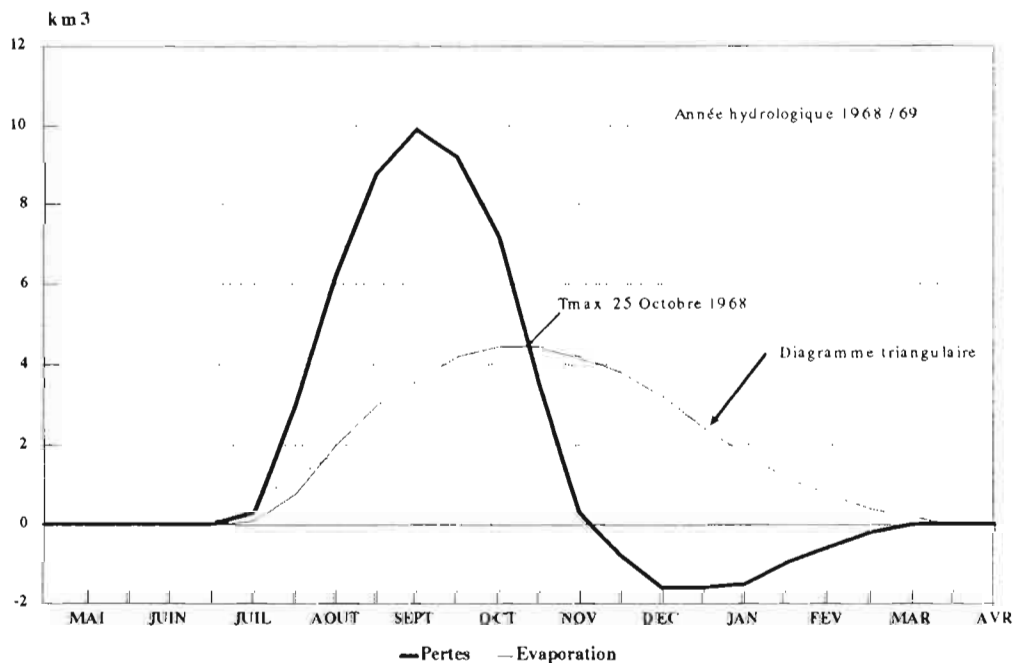


Figure n° 10
Exemple d'application du modèle Pertes / Evaporation dans le Delta Central avec détermination du volume mensuel évaporé au maximum de l'inondation (t_{max}).

Tableau 3 :

Evaluation des surfaces d'inondation maximales en année humide, moyenne et sèche

Année hydrologique	1954-55	1968-69	1985-86
Volume entrées km ³	90,7	55,6	28,9
Volume pertes km ³	42,7	20,3	9,33
Date du maximum t_{max}	6 Nov.	25 Oct.	13 Oct.
Pertes mensuelles km ³ centrées sur t_{max}	7,9	4,5	3,5
Evaporation mensuelle centrée sur t_{max} mm	183	185	195
Superficie correspondante km ²	43 200	24 300	17 900

Les surfaces d'inondation maximale ont été corrélées aux volumes des entrées, aux pertes annuelles et à la hauteur maximale de la crue à Mopti-Nantaka. Les régressions sont toutes de bonne qualité ; le paramètre "entrées" est cependant le plus pertinent. En termes de prévisions, le cumul des apports arrêté à la date du maximum de la crue constitue un bon paramètre d'estimation de la surface maximale d'inondation. Le tableau 4 et la figure 12 complètent cette analyse.

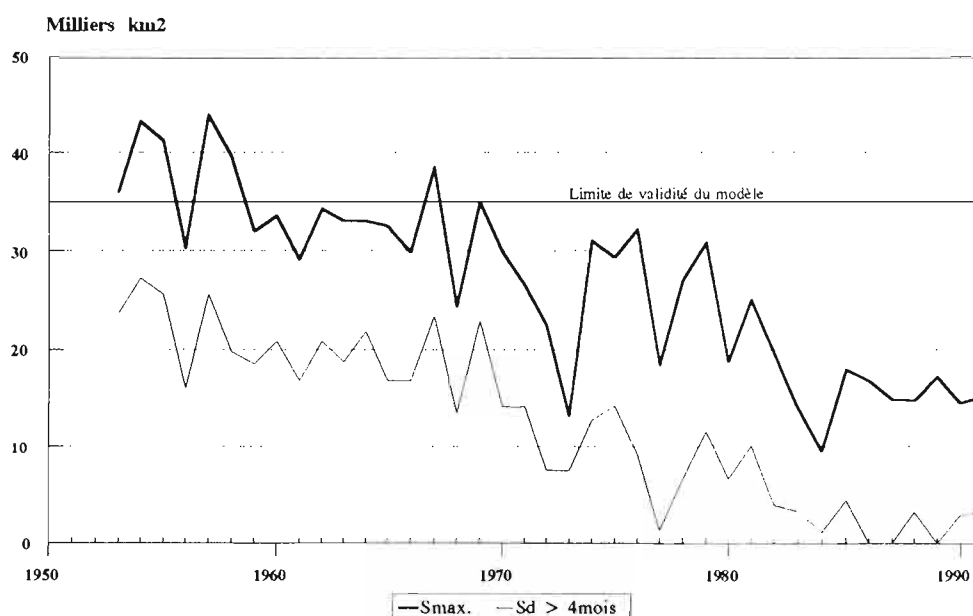


Figure n° 11

Estimation des surfaces maximales d'inondation (S_{MAX}) et des surfaces minimales d'inondation dépassées pendant 4 mois ($S_d \geq$) dans le Delta Central du Niger de 1953 à 1991.

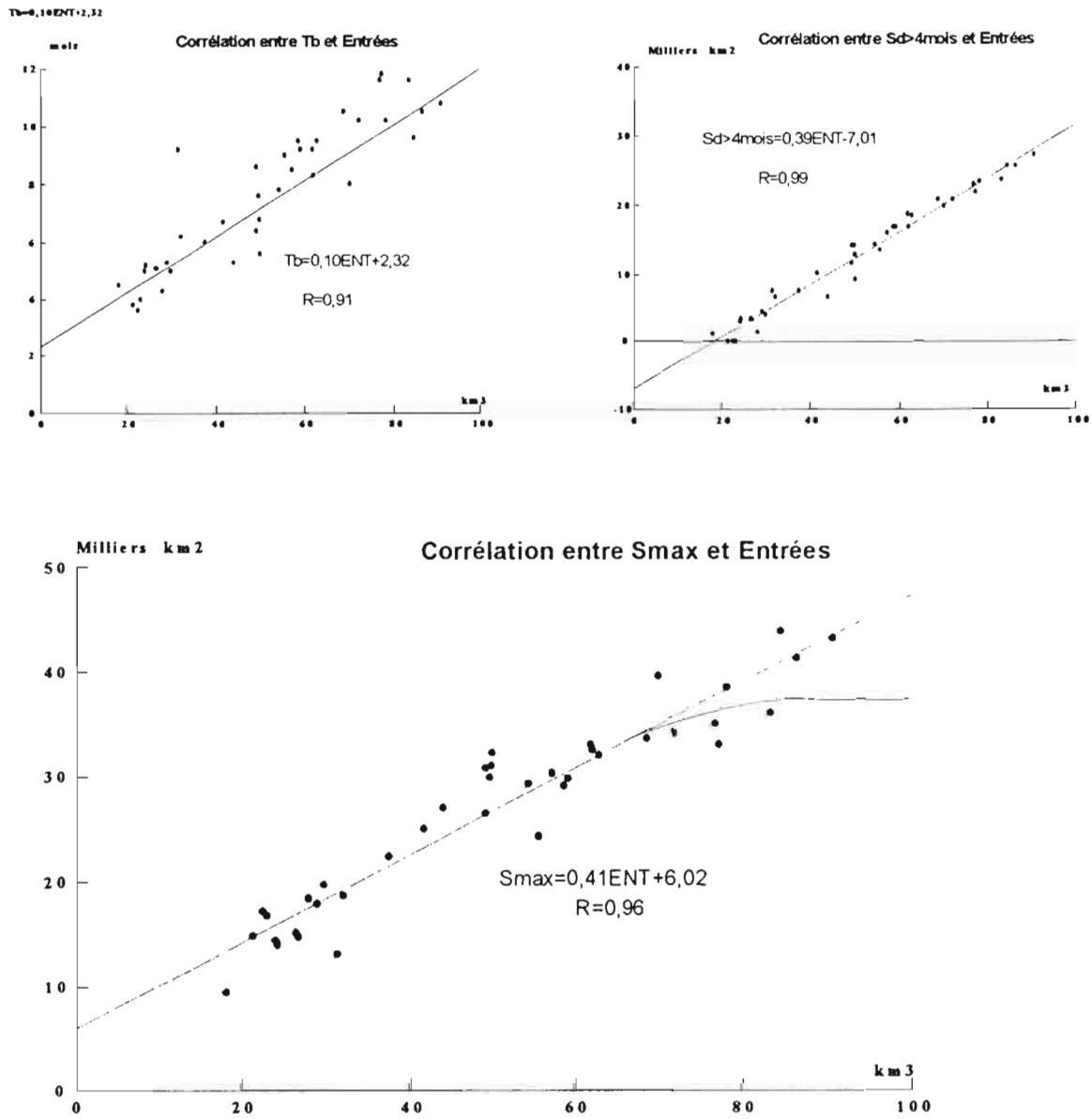


Figure n°12

Exemples de corrélations entre la superficie maximale d'inondation (S_{MAX}), la superficie minimale dépassée pendant 4 mois (S_d), le temps de base de l'inondation (T_b) et le volume des apports amont (entrées).

Tableau 4 :

Paramètres hydrologiques, extension maximale (Smax), temps de base (tB), extension spatio-temporelle (Sd ≥ 4 mois) de l'inondation dans le Delta Central du Niger ; termes des équations de régression $y = ax+b$ et coefficients de corrélation r pour $S_{max} = f(ENT)$, $f(\text{Apports Cumulés Max Crue})$, $f(\text{Pertes})$, $f(H \text{ Max})$, $tB = f(ENT)$ et $Sd = f(ENT)$.

Années	Variable x				Date	Variable y		
	ENT km ³	Apports cumulés Maxi Crue	Pertes km ³	Hmax,cm Mopti		Smax 10 ³ km ²	t _B mois	Sd ≥ 4mois 10 ³ km ²
1953	83.2	47	38.5	731	2-11	36	11.6	23.6
1954	90.7	46	42.7	731	6-11	43.2	10.8	27.2
1955	86.4	46	39.7	731	4-11	41.3	10.5	25.6
1956	57.2	29	23.7	686	1-11	30.3	8.5	16
1957	84.5	63	39.1	730	10-11	43.9	9.6	25.6
1958	70.1	36	29.1	703	29-10	39.6	8.0	19.8
1959	62.8	34	27.9	697	1-11	32.0	9.5	18.5
1960	68.7	44	32.3	697	2-11	33.6	10.5	20.8
1961	58.6	36	25.5	699	23-10	29.1	9.5	16.8
1962	72.1	41	31.9	706	6-11	34.3	10.2	20.8
1963	61.8	46	27.6	685	8-11	33.0	9.2	18.7
1964	77.2	50	35.6	716	4-11	33.0	11.8	21.8
1965	62.0	38	24.6	684	29-10	32.5	8.3	16.8
1966	59.1	45	24.9	686	8-11	29.8	9.2	16.8
1967	78.1	53	35.9	720	8-11	38.5	10.2	23.4
1968	55.6	31	20.3	651	25-10	24.3	9.0	13.5
1969	76.8	38	35.3	684	15-11	35.0	11.6	22.9
1970	49.8	29	20.9	658	20-10	29.9	7.6	14.2
1971	49.3	30	21.1	651	20-10	26.5	8.6	14.2
1972	37.4	23	12.4	565	7-10	22.4	6.0	7.5
1973	31.3	20	11.3	568	5-10	13.2	9.2	7.5
1974	50.0	30	20.2	650	21-10	31.0	6.8	12.8
1975	54.4	29	21.6	663	28-10	29.3	7.8	14.3
1976	50.1	32	16.4	623	17-11	32.2	5.6	9.2
1977	27.9	15	7.5	566	10-10	18.4	4.3	1.3
1978	44.0	23	13.6	620	22-10	27.0	5.3	6.6
1979	49.3	31	18.5	638	8-10	30.8	6.4	11.6
1980	32.0	18	10.8	592	8-10	18.7	6.2	6.6
1981	41.6	26	16.1	628	13-10	25.0	6.7	10.1
1982	29.7	18	9.1	551	1-10	19.7	5.0	3.9
1983	24.2	15	7.0	507	11-10	14.1	5.2	3.3
1984	18.0	15	4.1	440	20-10	9.5	4.5	1.1
1985	28.9	17	9.3	570	13-10	17.9	5.3	4.4
1986	23.0	13	6.3	534	10-10	16.8	4.0	0
1987	21.3	17	5.4	481	16-10	14.9	3.8	0
1988	26.7	17	7.2	571	8-10	14.8	5.1	3.2
1989	22.5	12	5.7	517	6-10	17.2	3.6	0
1990	24.0	14	6.9	510	10-10	14.5	5.0	2.9
1991	26.4	15	7.4	530	12-10	15.2	5.1	3.3
a(x)	0.41	0.64	0.75	0.11			0.10(ENT)	0.39(ENT)
b	6	7.5	11.6	-41			2.3	-7
r	0.96	0.91	0.94	0.94			0.91	0.99

N.B. : LES ESTIMATIONS DE SMAX SONT DONNEES A ± 15 %.

4 CRITIQUE DU MODELE ET EXTENSION SPATIO-TEMPORELLE DE L'INONDATION

Les résultats montrent pour les années de forte hydraulité des valeurs surestimées si on se réfère aux estimations faites sur carte de l'extension maximale de l'inondation dans la période contemporaine, plus proche de 35 000 que de 40 000 km² à Diré. Le modèle n'est donc plus adapté pour les très hautes eaux. Le remplissage des systèmes lacustres éloignés entraîne des pertes de volumes importantes dont l'épuisement par évaporation peut demander plusieurs années. En outre, les hypothèses de base simplifient trop le fonctionnement du Delta dont on a vu la complexité, il y a forcément décalage entre la partie amont du delta et la partie aval ; la notion d'étale du maximum reste très théorique: l'inondation progresse encore aux marges des basses plaines quand la décrue est déjà amorcée sur les axes d'écoulement principaux, et cela est d'autant plus vrai qu'en forte hydraulité, la mise en eau du système lacustre de rive droite apparaît tardivement. Enfin, les estimations de l'évaporation restent à vérifier ; bien qu'elles soient du même ordre de grandeur que sur le lac Tchad (2200-2300 mm an⁻¹), situé dans un contexte climatique comparable ; elles demandent à être précisées par des mesures *in situ* ; qu'en est-il de l'évapotranspiration des bourgoutières, rizières et vétiveraies ?

Quoi qu'il en soit, les déterminations proposées constituent une approximation acceptable des surfaces maximales d'inondation dans les conditions d'hydraulicités moyennes et faibles.

Pour les études de production halieutique (Laé, 1992), on préfère généralement, à l'extension maximale des inondations, utiliser un paramètre d'extension spatio-temporelle de celles-ci portant sur plusieurs mois. Les critères de définition de tels paramètres ressortent du choix de l'opérateur et de ses objectifs. On peut cependant proposer ici une méthode simple basée sur l'analyse qui vient d'être présentée. Le graphe des volumes mensuels évaporés (cf. figure 10) peut être ramené à un diagramme triangulaire dont la hauteur correspond au volume évaporé maximal VE centré sur t_{max}. Le temps de base (t_B) de ce diagramme est alors défini en mois par l'équation :

$$t_B = 2(\text{Pertes annuelles}/VE_{t_{max}})$$

On en déduira facilement la durée de l'inondation t_i dont l'extension S_i est supérieure ou égale à une proportion choisie de l'extension maximale des surfaces inondées S_{Max} ; l'évaporation mensuelle variant assez peu d'août à février - l'essentiel de la période d'inondation - le rapport retenu (K_S = S_i/S_{Max}) peut être directement utilisé dans l'expression :

$$t_i = (1 - K_S)t_B$$

Il faut bien préciser que cette méthode n'apporte pas de gain d'informations par rapport à l'utilisation des variables Pertes annuelles et S_{Max}, mais seulement une représentation plus concrète de l'extension spatio-temporelle de l'inondation.

Ainsi, avec un rapport de 0,5 appliqué aux superficies maximales d'inondation pour les années-type du modèle initial, on aurait :

- pour 1954 S_i ≥ 21 500 km² pendant t_i = 5,4 mois (160 j)
- pour 1968 S_i ≥ 12 000 km² pendant t_i = 4,5 mois (135 j)
- pour 1985 S_i ≥ 9 000 km² pendant t_i = 2,7 mois (80 j)

La méthode se prête aussi au calcul des surfaces minimales mises en eau (S_d) pendant une durée déterminée, t_d :

$$\text{avec } K_t = t_d/t_B \text{ on a } S_d = t_d^3 (1 - K_t)S_{Max}$$

Pendant une durée t_d de 4 mois, on aurait eu une superficie minimale inondée de 27 000 km² en 1954, de 13 300 km² en 1968, de 4 700 km² en 1985.

Les dernières colonnes du tableau 4 donnent un exemple d'estimations faites par cette méthode sur la chronique disponible.

Au terme de cette présentation, il paraît difficile d'obtenir par d'autres méthodes un gain significatif dans la connaissance du régime de l'inondation annuelle du Delta central sur la seule base des données existantes et de l'analyse hydrologique traditionnelle. Des études complémentaires sur l'évolution des concentrations et des flux de matières dissoutes (entrées et sorties), sur l'évaporation sur nappe d'eau libre et des études appropriées en télédétection devraient cependant permettre de préciser le fonctionnement de la cuvette lacustre. Celles-ci sont d'ores et déjà entreprises dans le cadre du projet sur l'environnement et la qualité des apports du Niger au Sahel (EQUANIS) (Olivry, 1992).

BIBLIOGRAPHIE :

- 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.
- GALLAIS J. (1967) Le delta intérieur du Niger et ses bordures. Etude morphologique. Paris CNRS, 153 p. Mémoires et documents. Centre de recherches et documentation cartographiques et géographiques.
- GUIGUEN N. (1985) Etudes hydrologiques complémentaires de la cuvette lacustre du Niger. Projet HYDRONIGER. ORSTOM Bamako. 88 p.
- LAE R. (1992) Impact des barrages sur les pêcheries artisanales du delta central du Niger. Cahiers Agricultures, Vol. 1992.2, Paris, pp. 14 - 21.
- LAMAGAT J.P. et MOLINIER M. (1983) Etude des anomalies des crues du Niger. ORSTOM, Travaux et documents de l'ORSTOM n° 161 112 p. Paris
- OLIVRY J.C. (1992) Environnement et Qualité des Apports du Niger au Sahel, document de projet, ORSTOM, Bamako, 40 p.
- POUYAUD B. (1986) Contribution à l'évaluation de l'évaporation de nappes d'eau libre en climat tropical sec, 254 p., coll. Etude et Thèses, ORSTOM

PREMIERS RESULTATS SUR LA MESURE DES FLUX DE MATIERES DISSOUTES ET PARTICULAIRES DANS LES APPORTS DU NIGER AU SAHEL

J.C.OLIVRY, L. GOURCY et M.TOURE

RESUME :

Depuis 1990, une étude des flux de matières dissoutes et particulaires est menée conjointement sur le haut bassin du Niger et dans sa cuvette lacustre (ou Delta intérieur). Les premiers résultats montrent de très faibles concentrations des matières en suspension avec une dégradation spécifique de l'ordre de 7 à 8 t km² an⁻¹ sur le Niger supérieur et de 3 t km² an⁻¹ sur son affluent principal le Bani. Les flux spécifiques de matières dissoutes sont également très modestes variant de 10 à 12 t km² an⁻¹ sur le Niger à 2,5 t km² an⁻¹ sur le Bani. Dans la traversée du Delta intérieur, environ ¼ des charges en suspension et des charges dissoutes se déposent dans les plaines d'inondation sur un flux global des entrées de 2,2 millions de tonnes en 1992 - 93. Les variations saisonnières de ces flux montrent des comportements différents des parties amont et aval du Delta intérieur dus principalement aux conditions de l'amortissement de la crue annuelle dans son transfert de l'amont vers l'aval.

ABSTRACT : Dissolved and suspended matter fluxes in the Niger river's yields to the Sahel.

Since 1990, the dissolved and suspended matter fluxes in the Niger river's yields to the Sahel are measured. First results on the upper basin and after the inner Delta show low concentrations of matter. The specific sediment load varies 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 varies 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.

1 INTRODUCTION :

Depuis 1990, le projet sur l'environnement et la qualité des apports du Niger au Sahel (EQUANIS) s'est attaché à mettre en place au Mali un réseau de stations d'observation des flux de matières particulaires et dissoutes en développant progressivement les thématiques de recherches du PEGI. Ce réseau s'appuie sur la connaissance des transferts hydriques bien identifiés dans le suivi de stations hydrométriques de référence (Brunet-Moret et al., 1986). Les protocoles de mesure ont été adaptés aux conditions particulières du réseau hydrographique du Niger notamment dans la cuvette lacustre, où les écoulements sont particulièrement lents et où les vastes plaines d'inondation conduisent à l'observation de dépôts et à une évolution des flux de matière. La représentativité des contrôles journaliers de la charge solide a été vérifiée à partir de mesures complètes des débits solides ; les faibles concentrations observées et la dispersion relative des résultats exigent la multiplication des prélèvements afin d'identifier les variations saisonnières significatives du transport de matière (élimination d'anomalies ponctuelles dues à des effets de berge, contrôle d'un bon mélange des apports de tributaires différents).

Le régime des exportations de matière des bassins amont est étudié :

- à la station de Banankoro sur le Niger à son entrée au Mali (bassin de 71 800 km² et régime naturel) ;

- à la station "historique" de Koulikoro (bassin de 120 000 km²), après confluence avec le Sankarani dont le régime est influencé par la retenue de Sélingué ;
- à la station de Macina (après prélèvement par les canaux de l'Office du Niger et avec l'influence du barrage de Markala) ;
- à la station de Douna sur le Bani, tributaire principal du Niger (bassin de 102 000 km² en régime naturel).

Ces deux dernières stations ont été retenues comme références des flux d'entrée dans la cuvette lacustre - ou Delta intérieur du Niger.

Le suivi des principaux effluents du système Niger-Bani dans le Delta intérieur est assuré aux stations de Kara sur le Diaka, de Tilembeya et Nantaka sur le Niger, de Sofara sur le Bani, avant regroupement dans le lac Débo des eaux de la cuvette amont.

Un premier bilan des sorties du lac Débo est effectué sur les trois défluent du lac aux stations d'Akka sur l'Issa Ber, d'Awoye sur le Bara Issa et de Korientzé sur le Koli-Koli. Ces trois défluent reforment un bief unique peu en amont de Diré ; c'est à cette station que l'on contrôle les sorties de l'ensemble du Delta Intérieur.

2 PREMIERS RESULTATS SUR LES BASSINS SUPERIEURS DU NIGER ET DU BANI

2.1 Régime du transport de matières en suspension

Après validation de la représentativité des prélèvements journaliers effectués par des observateurs (Fig. 1) et, dans le cas contraire, en prenant seulement en compte des mesures hebdomadaires ou mensuelles (jaugeages du débit solide) réalisées par l'équipe de recherche (Nouvelot, 1972), l'étude des matières en suspension dans les eaux des bassins amont montre des variations saisonnières des concentrations caractéristiques des fleuves tropicaux. Les concentrations les plus élevées correspondent au début de la saison des pluies. Elles dépassent rarement 100 mg l⁻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.

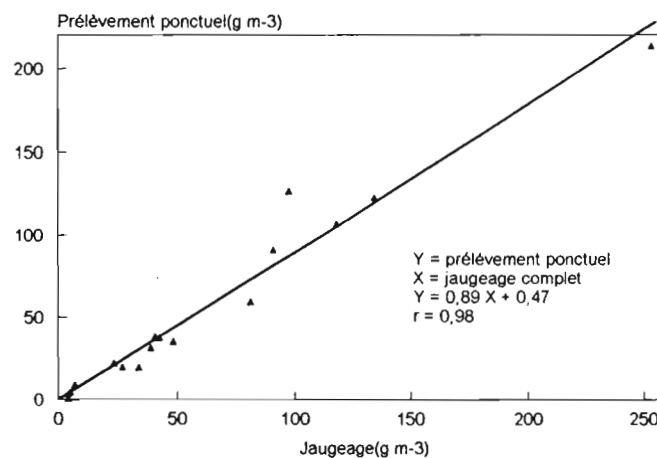


Figure n° 1

Exemple de corrélation entre jaugages et prélèvements observateurs

La figure 2 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. 3) correspond à un phénomène classique en zone tropicale.

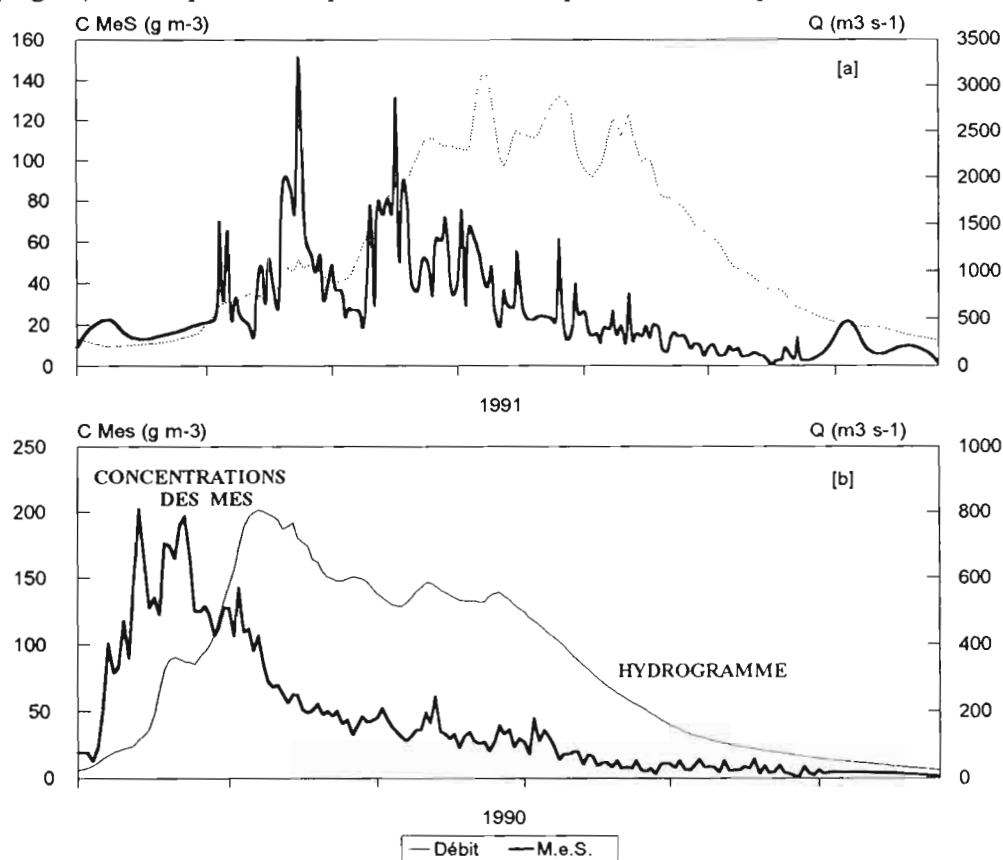


Figure n° 2
Exemples d'hydrogrammes et de concentrations en M.e.S. pour le Niger à Koulikoro (a) et le Bani à Douna (b).

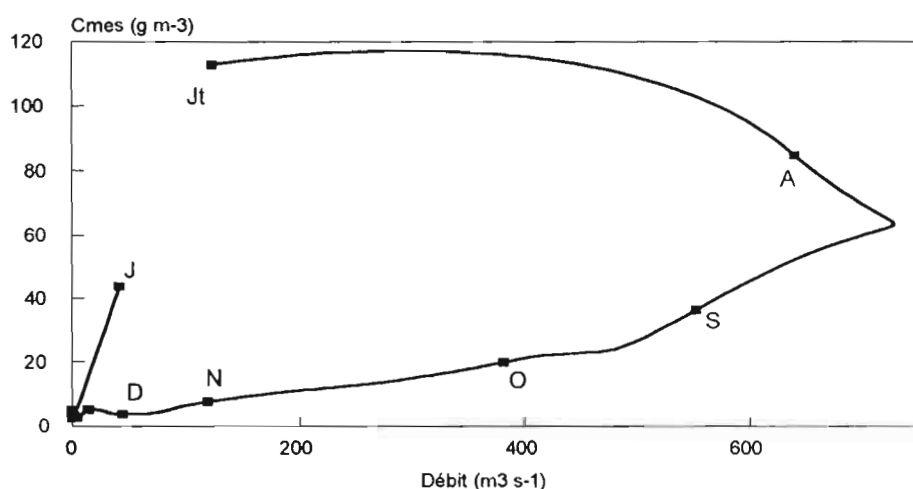


Figure n° 3
Exemple de relation Concentration - Débits pour le Bani à Douna

La figure 4 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.

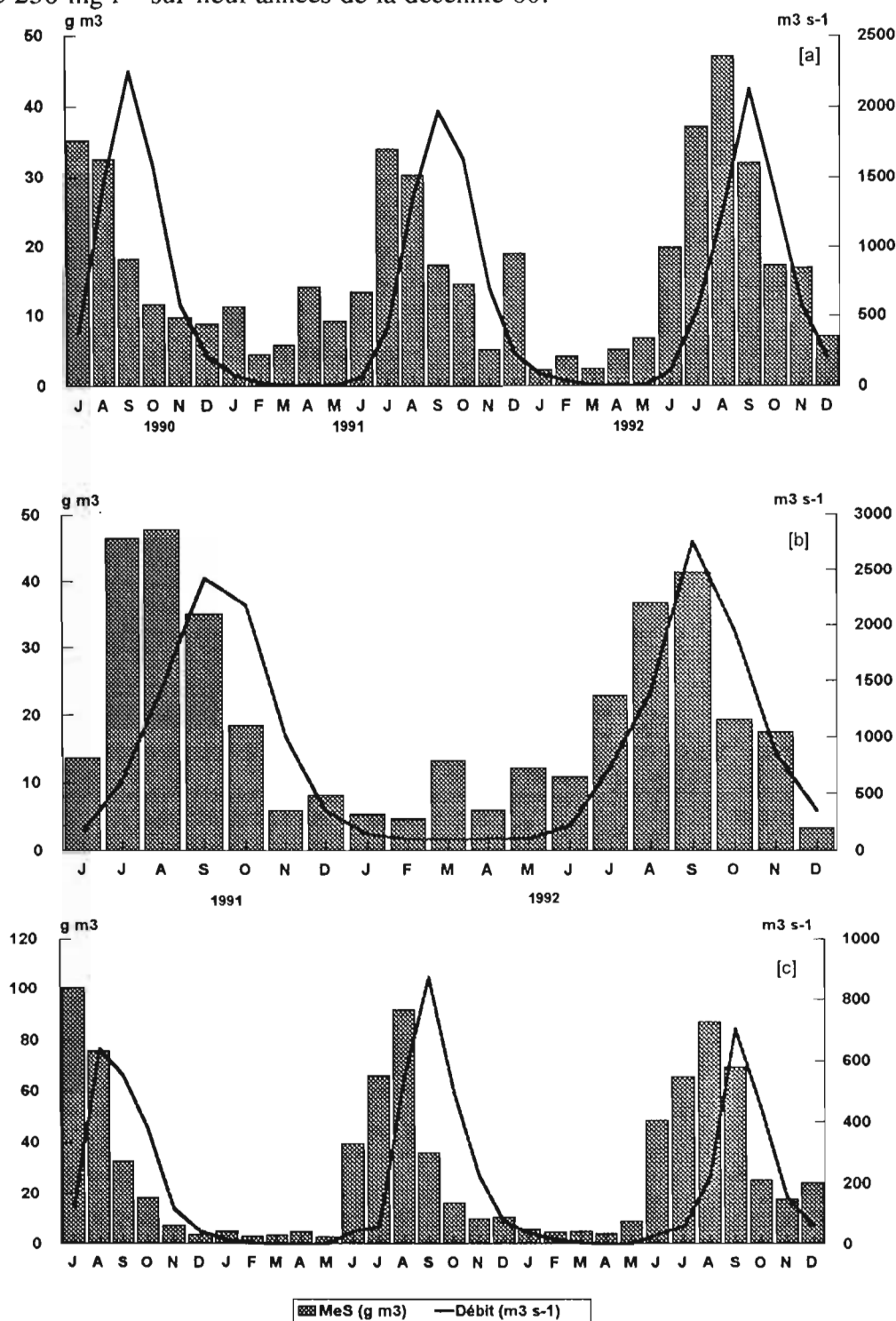


Figure n° 4
Concentrations moyennes mensuelles des suspensions et débits mensuels pour le Niger à Banankoro (a), le Niger à Koulikoro (b) et le Bani à Doua (c)

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 maximums 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.

Le bilan annuel des exportations de matières en suspension est indiqué dans le tableau 1.

Tableau 1 :

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

En terme d'érosion spécifique, les valeurs de la dégradation moyenne annuelle varient de 8, 1 à 6,6 t km⁻² an⁻¹ pour le Niger à Banankoro et le Niger à Koulikoro, et de 3,2 à 2,5 t km⁻² 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 Sénégal dont la valeur moyenne est de 16,7 t km⁻² 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. Les hauts bassins guinéens des deux fleuves sont moins sensibles à l'érosion.

2.2 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 2.10⁹ m³) ; ces apports de la retenue d'origine essentiellement liés aux écoulements superficiels de la saison des pluies précédente, sont moins concentrés en éléments dissous.

La figure 5 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.

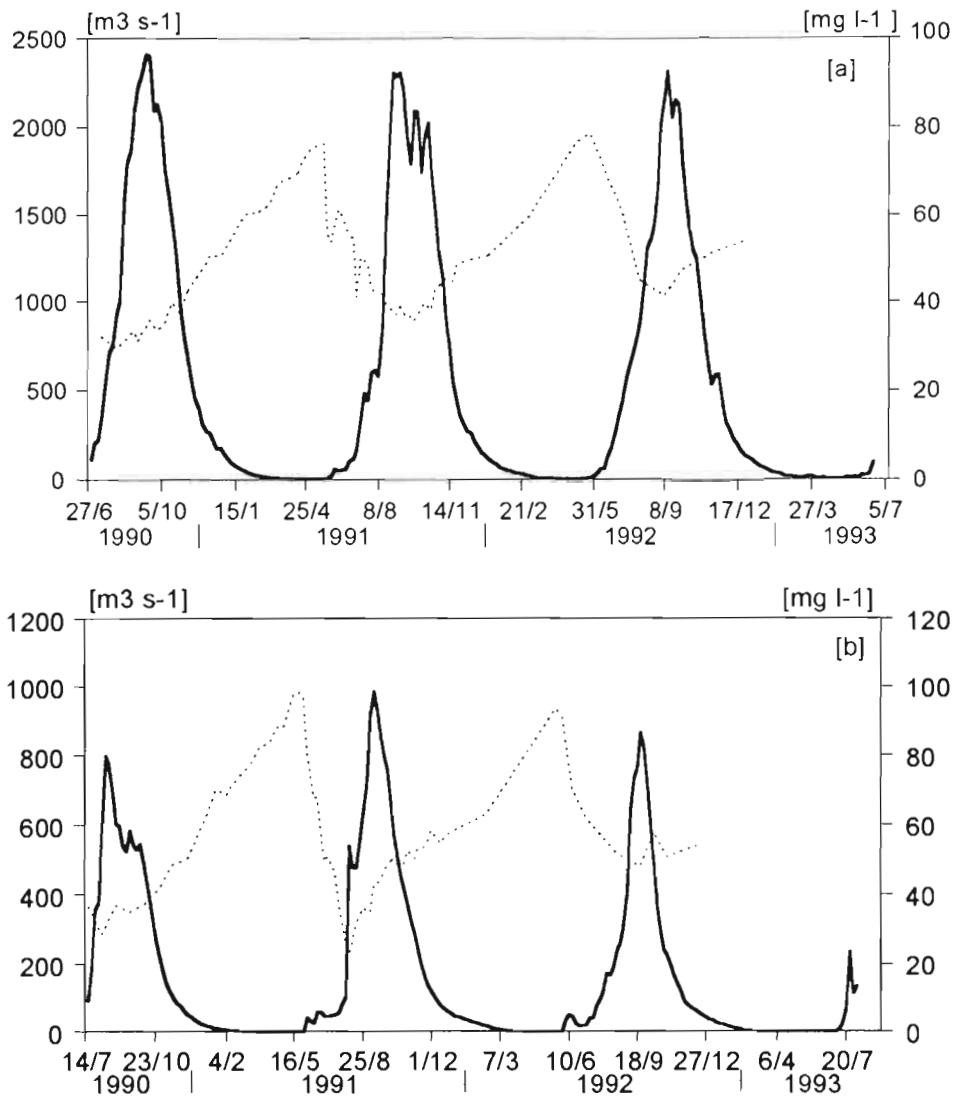


Figure n° 5

*Concentrations des matières dissoutes et débits journaliers (en gras)
pour le Niger à Banankoro (a) et le Bani à Douna (b)*

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 $11 t km^{-2} an^{-1}$ sur le Niger à Banankoro, de $8 t km^{-2} an^{-1}$ sur le Niger à Koulikoro et seulement de $2,6 t km^{-2} an^{-1}$ sur le Bani à Douna.

Le tableau 2 résume les résultats acquis au cours des premières années d'observation en matière de flux spécifiques.

Le rapport matières dissoutes/matières en suspension est de 1,5 pour le Niger à Banankoro et de 0,9 pour le Bani à Douna.

L'analyse qualitative et quantitative des constituants de la matière dissoute fait l'objet d'études en cours de réalisation dont les premiers résultats sont donnés par ailleurs.

Tableau 2 :
Flux spécifiques sur les bassins supérieurs du Niger et du Bani

Station et année	Écoulement annuel $l\ s^{-1}\ km^{-2}$	Suspensions $t\ an^{-1}\ km^{-2}$	Matières Dissoutes $t\ an^{-1}\ km^{-2}$
Niger à Banankoro			
1990	7.4	-	-
1991	7.6	8.1	10.4
1992	7.4	6.6	11.7
Niger à Koulikoro			
1990	6.1	-	-
1991	6.4	7.4	8.0
1992	6.4	6.3	7.8
Bani à Douna			
1990	1.5	2.8	-
1991	1.9	3.2	2.7
1992	1.4	2.5	2.5

2.3 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.

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.

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

La relation $\delta^{18}O / \delta^2H$ 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. 6). 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 valeurs sont : $\delta^{18}O = 4.5\text{‰}$, $\delta^2H = -25.9\text{‰}$ pour la décrue. Ces eaux se placent sur la droite de la chronique des eaux de pluies à Bamako ($\delta^2H = 5.8 * \delta^{18}O - 0.9$).

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 : $\delta^{18}\text{O} = -5\text{‰}$; $\delta^2\text{H} = -30\text{‰}$ pour la crue et $\delta^{18}\text{O} = -4.3\text{‰}$; $\delta^2\text{H} = -24.2\text{‰}$ pour la décrue. 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.

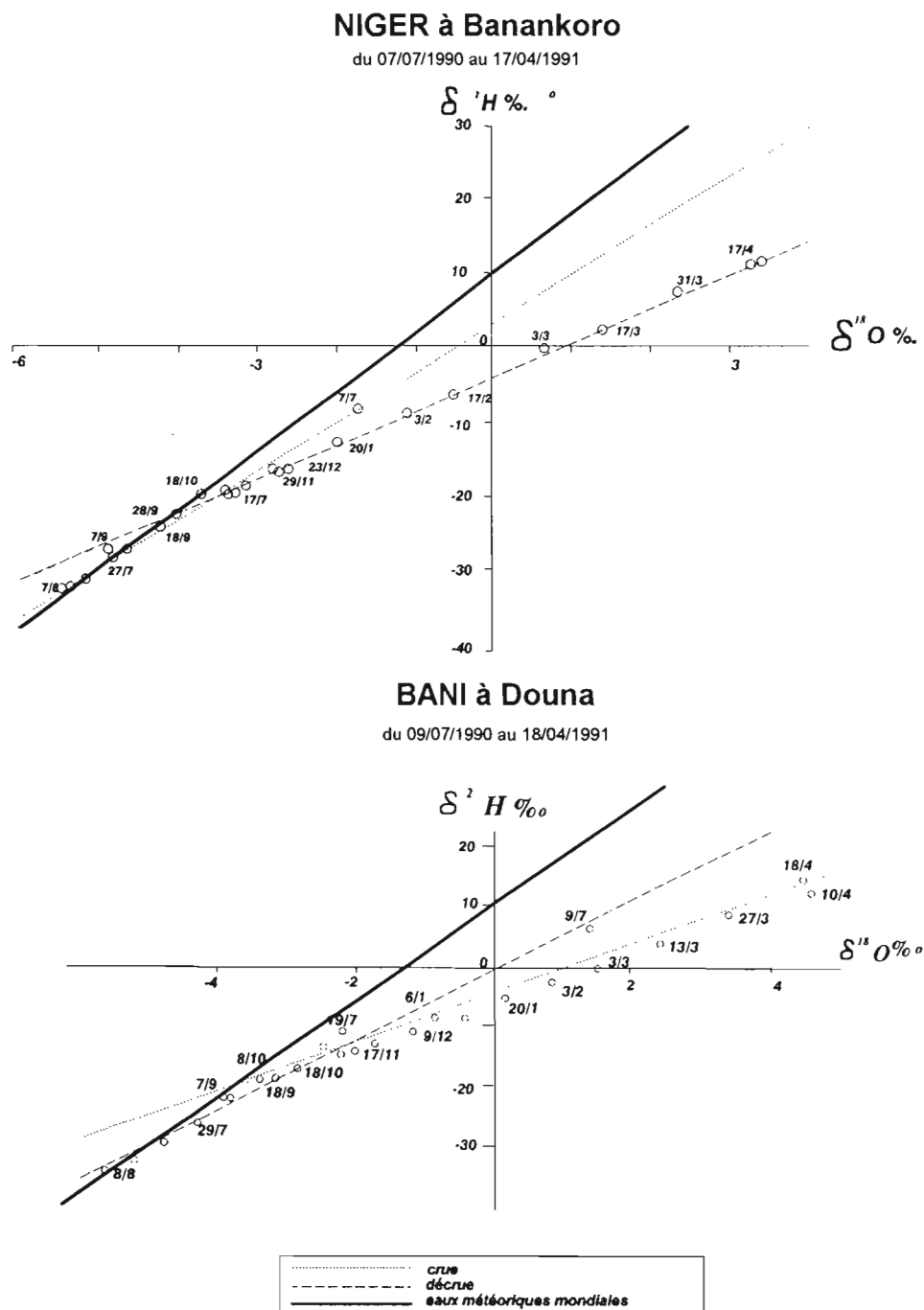


Figure n° 6
Variations de la composition isotopique moyenne des eaux pour le Niger à Banankoro (a) et le Bani à Douna (b)

3 BILAN ET VARIATION DES FLUX DE MATIERE 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, anévrisse 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.

3.1 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 des suspensions de 331 000 t avant le lac Débo et au contraire un gain de 87 000 t entre le lac Débo et Diré (Fig. 7).

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 :

- **partie amont du Delta** : la baisse de concentration des MES ($-8,4 \text{ mg l}^{-1}$) pourrait indiquer qu'au piégeage 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 biologique (diatomées), s'associent à l'évaporation au fil des écoulements pour reconcentrer les suspensions à Diré.

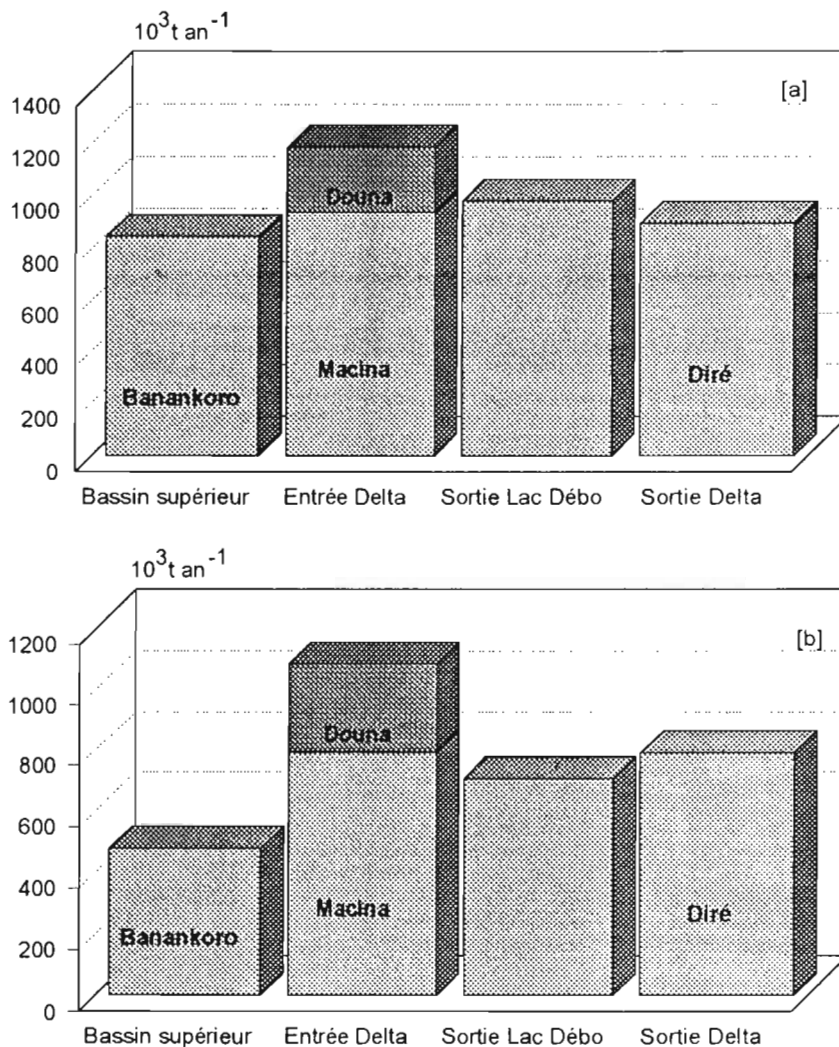


Figure n° 7

Bilan annuel (1992 - 1993) des transports dissous (a) et particulaires (b) du fleuve Niger.

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 8 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 hydrodynamique du Niger dans sa traversée du Delta.

Tableau 3 :
Bilan des flux hydriques et de matières dans le Delta intérieur du Niger.
Année 1992 - 1993.

	Ecoulement 10^9 m^3	Suspensions		Matières dissoutes	
		tonnage	concentration	tonnage	concentration
		10^3 t	g m^{-3}	10^3 t	g m^{-3}
Entrées					
Ké-Macina + Douna	24.22	1034	(42.7)	1189	(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	

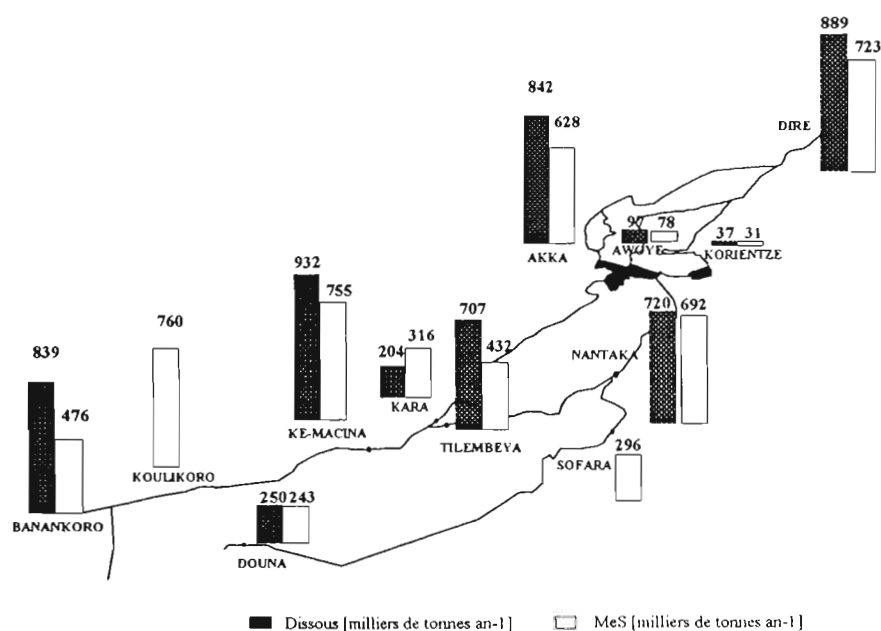


Figure n° 8
Variation spatiale des transports dissous et particulaires du fleuve Niger en 1992 - 1993.

3.2 Variations saisonnières des flux de matière

Le bilan mensuel des flux de matière 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. A 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. A 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 matière 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. Les figures 9 illustre ces variations de flux des suspensions pour les deux parties du Delta et pour l'ensemble de la cuvette lacustre.

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.

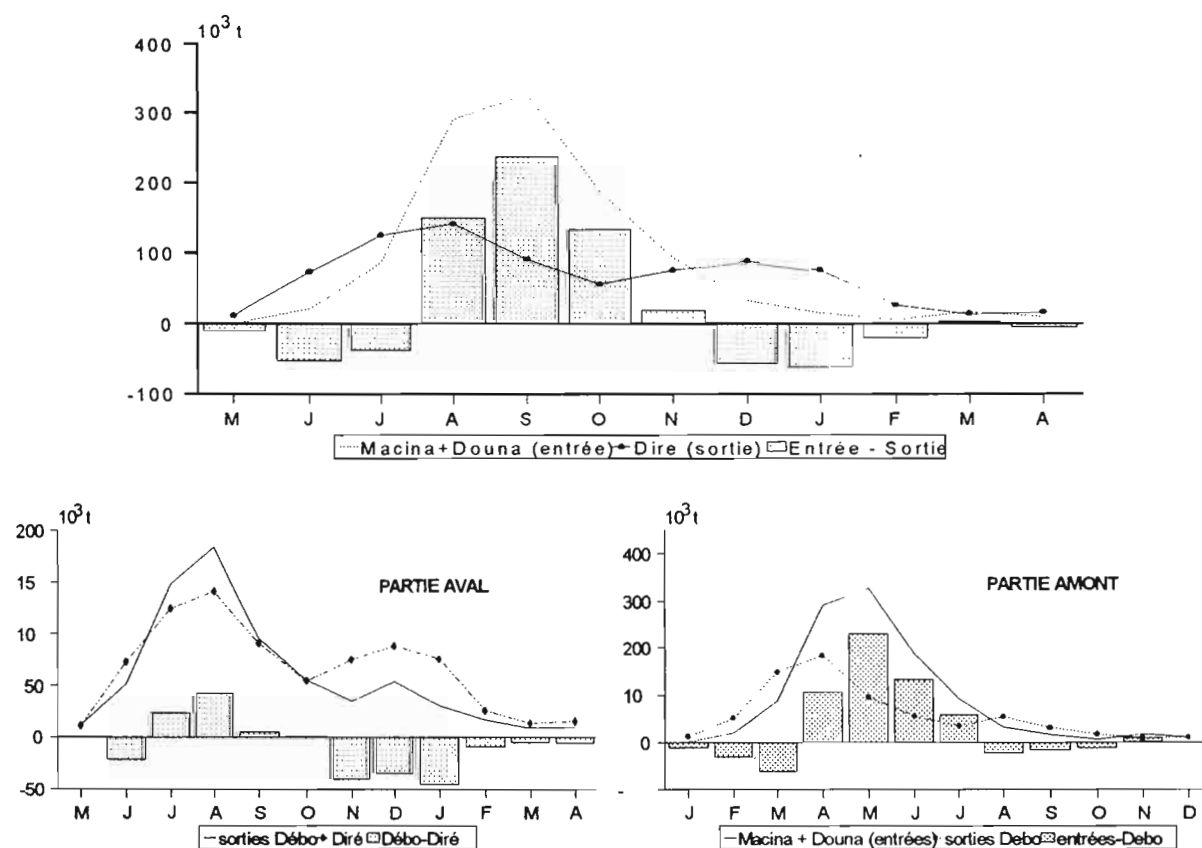


Figure n° 9

Variations mensuelles des transports particuliers du fleuve Niger en 1992 - 1993.

4 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 ; les travaux en cours sur la composition minéralogique et la sédimentologie des suspensions, sur la composition de la charge dissoute, sur la matière organique, sur le bilan des intrants d'origine météoriques devraient permettre de préciser le régime des flux de matière du Niger dans sa traversée du Sahel et des régions sub - sahariennes.

BIBLIOGRAPHIE

- 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.
- 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, n° 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.
- NOUVELOT J.F. (1972) Méthodologie pour la mesure en réseau des transports solides en suspension dans les cours d'eau intertropicaux peu chargés. Cah. ORSTOM sér. Hydrol., vol. IX, n°1, pp. 3-18.
- ORANGE D. (1990) Hydroclimatologie du Fouta Djallon 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.

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 et 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).

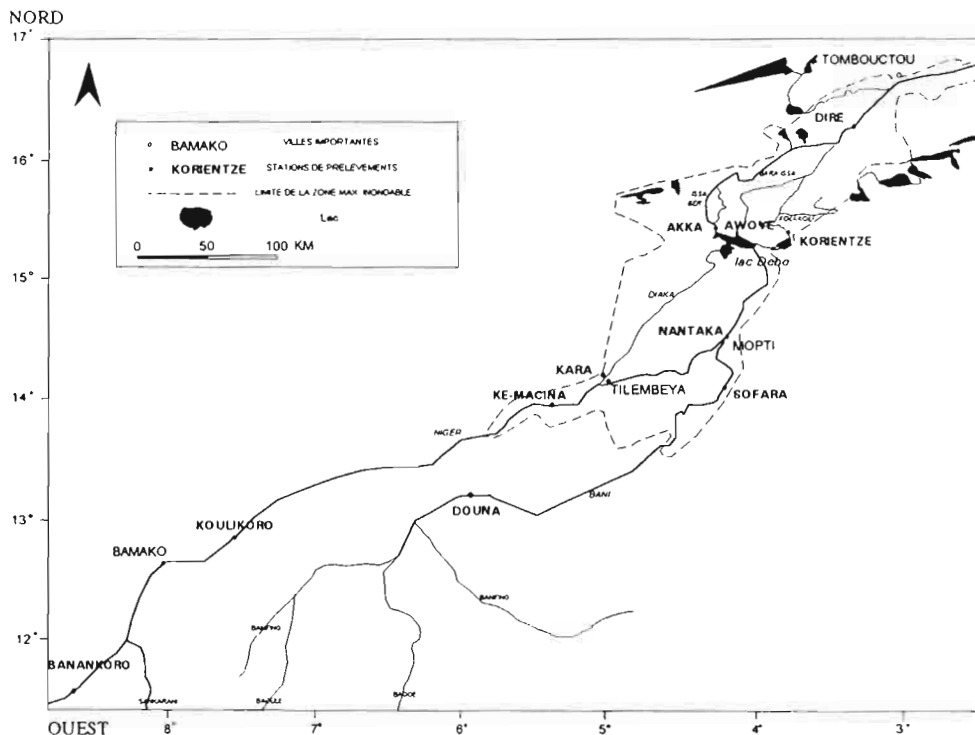


Figure 1

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'été.

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).

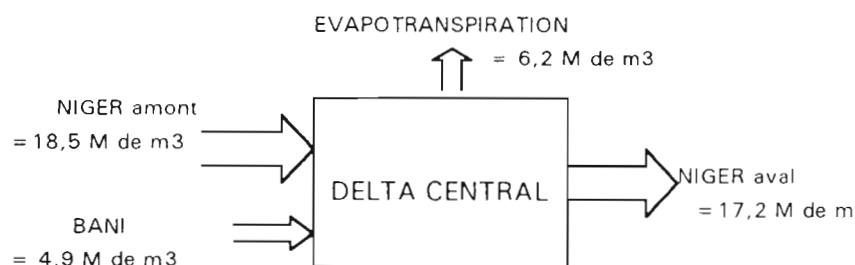


Figure 2
Bilan hydrologique de l'année 1990-91

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	rivière	date	Ca		Mg		K		Na		Tac		Cl		NO3		SO4		SiO2		S dissous mg/l
			mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	
Banankoro	Niger	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
		étiage	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	Niger	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
		étiage	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	Bani	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
		étiage	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	Bani	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
		étiage	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	Diaka	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
		étiage	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	Niger	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
		étiage	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	Issa ber	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
		étiage	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	Bara Issa	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
		étiage	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	Koli-Koli	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
		étiage	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	Niger	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
		étiage	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

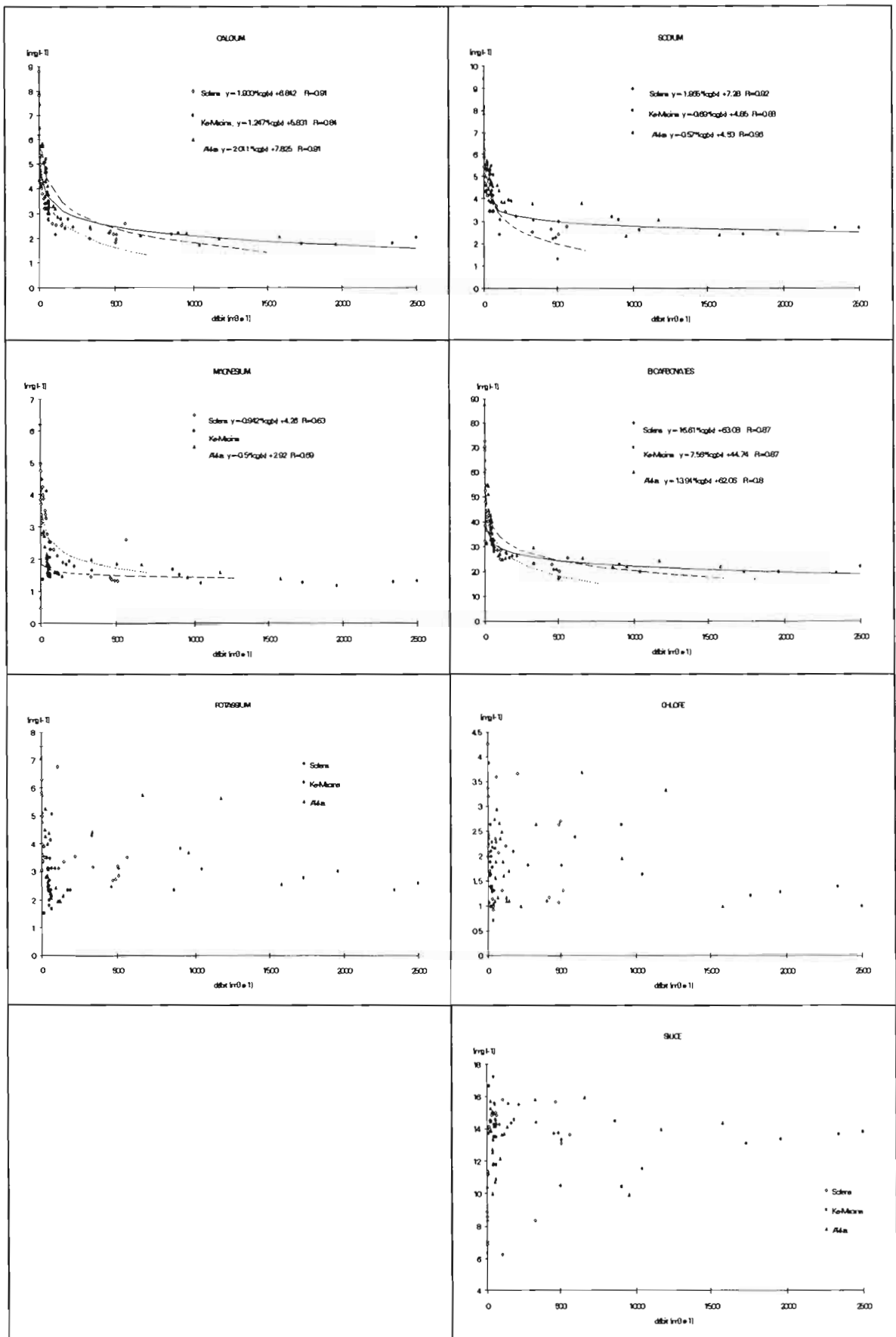
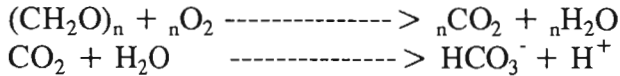


Figure 3
 Evolution des principaux éléments dissous en fonction du débit sur trois stations :
 Sofara (Bani), Ke-Macina (Niger) et Akka (Issa Ber).

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 ne représentent que 0 à 2% des éléments dissous totaux mais ne sont pas significatives vu le temps de stockage des échantillons.

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 Ca²⁺, Na⁺ et HCO₃⁻ sont bien reliés aux débits (R < -0.84). Mg²⁺ 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

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

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.

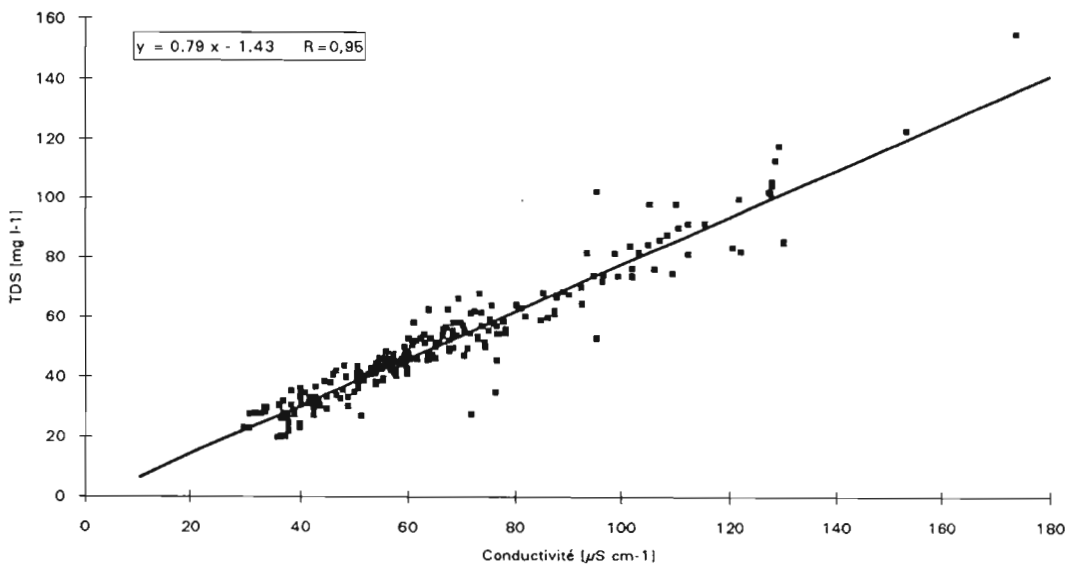


Figure 4 :
Relation entre le TDS (sauf silice) et la conductivité pour toutes les stations.

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).

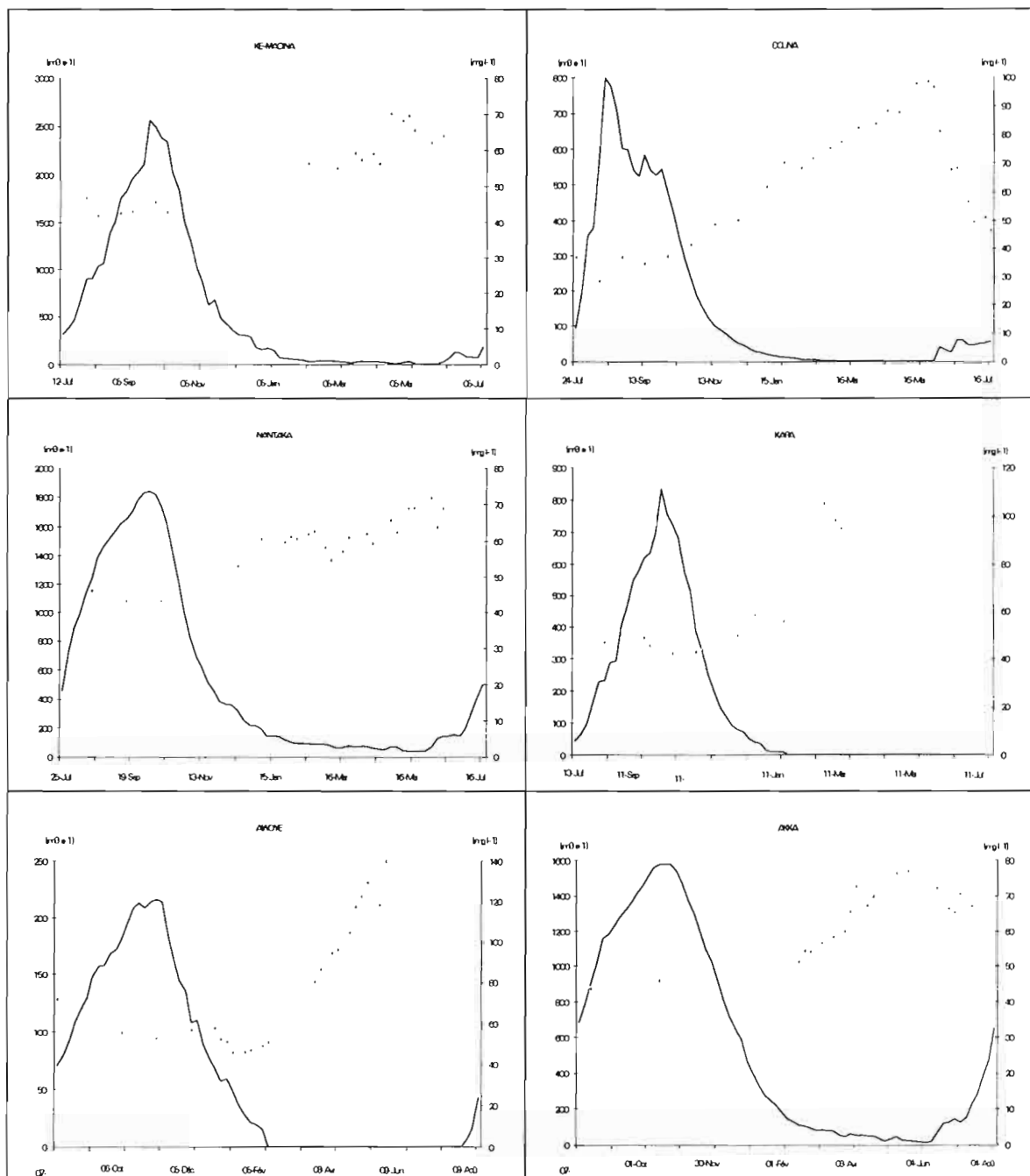


Figure 5
Evolution des éléments dissous (année 1990 - 1991).

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'infiltrent 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.

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 $1,03.10^6$ t an⁻¹.

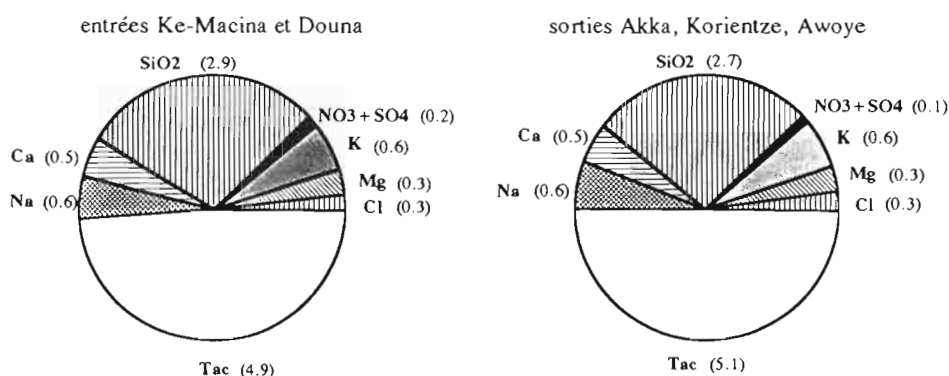


Figure 6

Bilan de matières dissoutes (10^5 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.

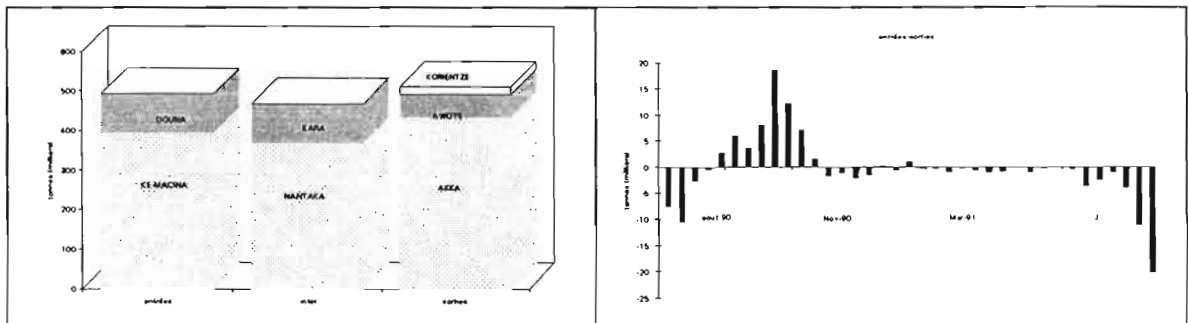


Figure 7
Bilan annuel et décadaire du bicarbonate

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).

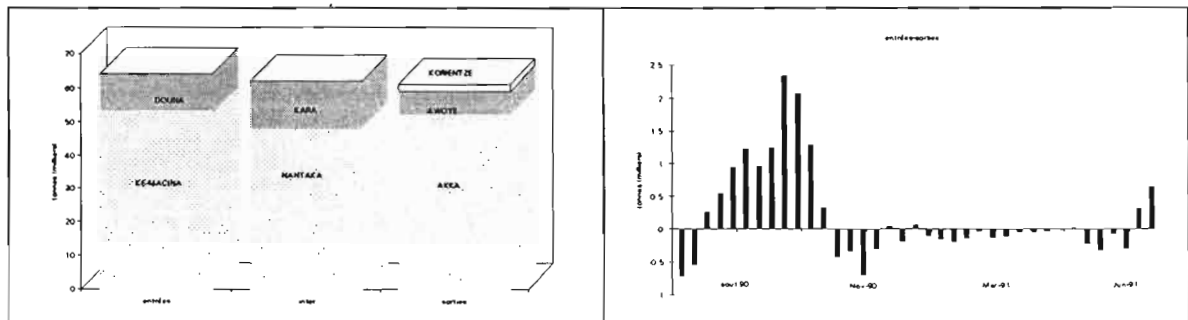


Figure 8
Bilan annuel et décadaire du sodium.

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%.

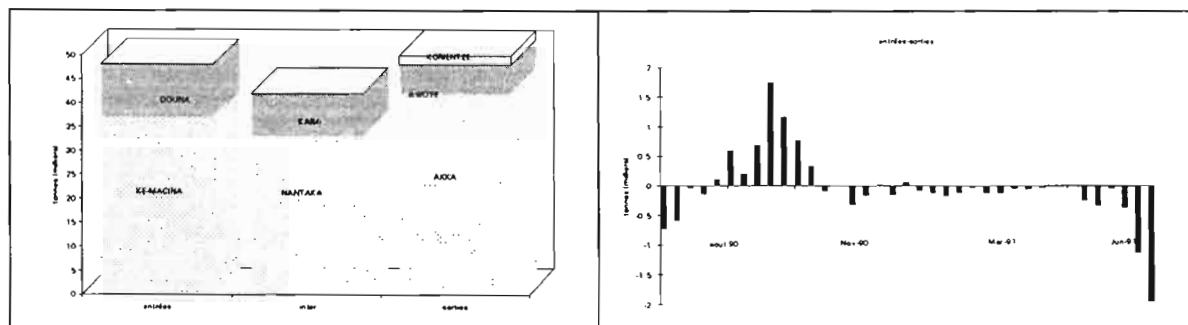


Figure 9
Bilan annuel et décadaire du calcium.

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%.

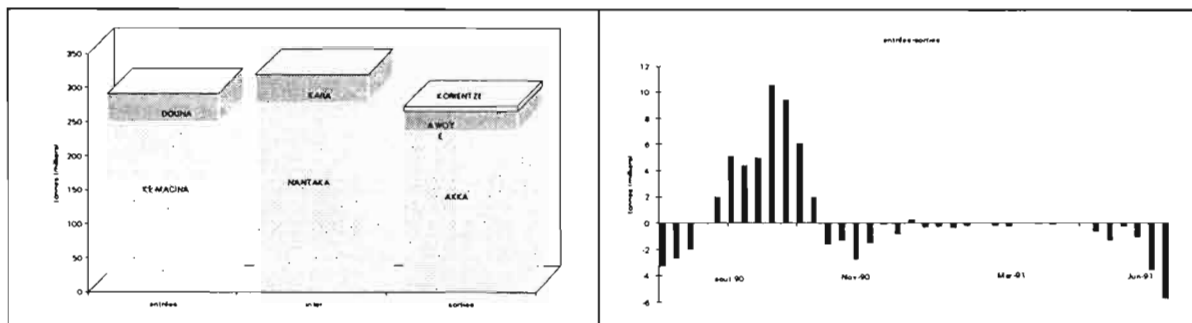


Figure 10
Bilan annuel et décadaire de la silice.

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 CO_2 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. Le problème 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.

LES APPORTS DETRITIQUES TERRIGENES DANS LA CUVETTE LACUSTRE DU NIGER ENTRE MOPTI ET KONA (REPUBLIQUE DU MALI)

C. CENSIER, J. C. OLIVRY et J. P. BRICQUET

RESUME

Les apports détritiques terrigènes dans la partie supérieure de la cuvette lacustre du Niger sont précisés par analyse sédimentologique d'alluvions prélevés dans le chenal de la cuvette entre Mopti et Kona, et dans le cours inférieur de ses deux principaux tributaires, le Niger et le Bani. La fraction d'origine fluviale est issue du démantèlement des grès horizontaux précambriens et des formations granito-gneissiques et birrimiennes situées dans la partie supérieure du bassin du Niger et du Bani. Le matériel détritique est principalement apporté par le Bani. La fraction d'origine éolienne provient très probablement de la déflation des grands ergs situés au nord de la cuvette d'où elle a été amenée par l'Harmattan.

INTRODUCTION

Troisième fleuve d'Afrique par sa longueur (4 200 km), le Niger constitue une artère vitale pour l'économie soudano-sahélienne des Républiques du Mali et du Niger.

Sur le territoire malien, entre Ké Macina et Tombouctou, le Niger présente tout un ensemble d'effluents, de chapelets de mares et de lacs constituant la "Cuvette Lacustre" (Fig. 1) ; cette vaste étendue est, selon l'abondance hydrologique, inondée sur une superficie de plus de 80 000 km² où s'étalent 15 à 35 milliards de m³ d'eau (BRUNET-MORET et al., 1986).

La cuvette lacustre, située pour partie en domaine sahélien et pour partie en domaine subdésertique, est une formidable machine évaporatoire en Afrique de l'Ouest ; selon l'importance de la crue, les pertes varient entre 25 et 55 milliards de m³, c'est-à-dire représentent, au niveau de Diré, 32 à 47% des entrées dans la cuvette (OLIVRY, 1992).

Par rapport à ces particularités hydrologiques, l'objet de cette note est de présenter les différents apports détritiques terrigènes dans la cuvette lacustre.

L'étude portera essentiellement sur les apports dans la partie supérieure de la cuvette, entre Mopti et Kona.

1 CADRE GÉOLOGIQUE DU BASSIN SUPÉRIEUR DE LA CUVETTE LACUSTRE

Le réseau hydrographique des tributaires de la cuvette lacustre s'organise autour du Niger et de son affluent principal, le Bani (Fig. 1).

Depuis les sources des différentes branches constituant le Niger et le Bani jusqu'au niveau de la cuvette lacustre, les différents cours d'eau qui s'écoulent globalement vers le nord-est, à l'exception du Banifing, affluent du Bani, traversent les unités géologiques suivantes (Fig.1) :

1°- un ensemble granito-gneissique, d'âge précambrien inférieur ou dahomeyen. Il représente le soubassement de tout le haut bassin du Niger et du Bani ;

2°- les formations birrimiennes. On distingue, d'une part, des micaschistes et, d'autre part, des schistes et quartzites. Ces formations couvrent près de la moitié du bassin supérieur du Niger ; elles représentent le bedrock des branches supérieures du Bani bien que ce soit l'ensemble granito-gneissique qui affleure dans la majeure partie du bassin supérieur du Bani.

Les schistes dominent à l'est et à l'ouest du bassin (Tinkisso, Niger, Milo et Bagoé) alors que les micaschistes affleurent principalement au centre du bassin (Sankarani et bassin du Baoulé).

Les formations birrimiennes, plus ou moins métamorphisées, sont recoupées par des granites et surtout des dolérites (cours inférieur du Niandan) ;

3°- les grès horizontaux précambriens. Les différentes unités apparaissent sous forme d'auréoles sensiblement concentriques autour de la cuvette lacustre. Elles occupent les parties septentrionales des bassins du Niger supérieur, du Baoulé et du Bagoé et constituent tout le bassin versant du Banifing et des affluents inférieurs du Bani.

Du sud au nord et de bas en haut de la série, on distingue (BASSOT et al., 1981) :

- les grès de Sikasso, les grès de Sotuba qui constituent le lit du Niger sur plus de 100 km à l'amont de Koulikoro, et les grès de Koulouba ;

- les grès de Kati, de Koutiala et de Bandiagara. Les grès de Bandiagara sont puissants ; dans la cuvette lacustre, ils sont démantelés et affleurent peu alors que les grès de Koutiala, correspondant à l'étage inférieur des précédents, en constitue le radier (BRUNET-MORET et al., 1986) ;

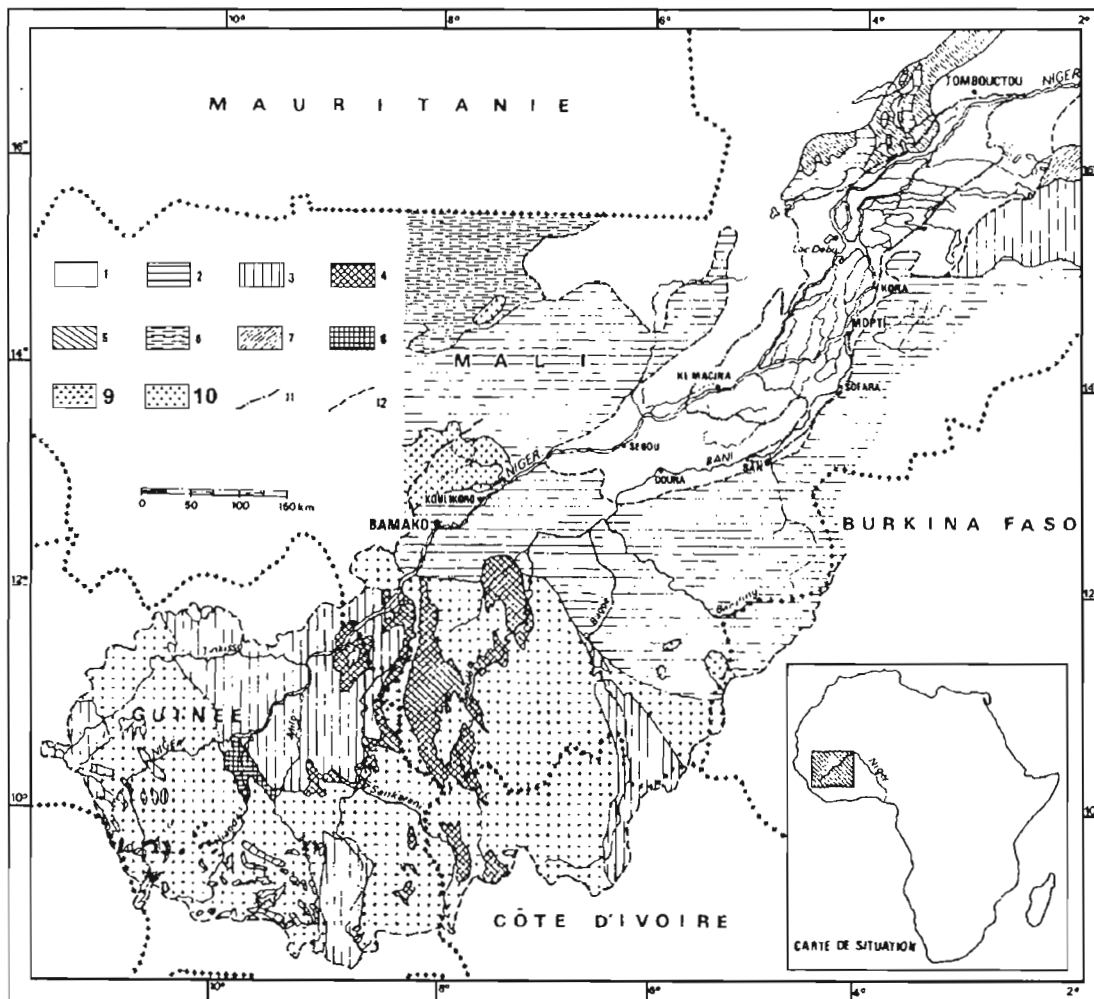


Figure n° 1

Géologie de la cuvette lacustre du Niger et de son bassin versant (d'après Brunet - Moret (1986), modifié). 1: Continental terminal et alluvions - 2 : Grès horizontaux précambriens - 3/4/5/6/7 : Formations birrimiennes : 3 : Schistes et quartzites ; 4 : Micaschistes ; 5 : Schistes infracambriens ; 6 : Schistes de Nara ; 7 : Schistes de Gourna - 8 : roches vertes - 9 : dolérites - 10 : Ensemble granito-gneissique - 11 : Limites de la cuvette lacustre - 12 : Limites du bassin versant du Niger Supérieur

4°- les formations sédimentaires cénozoïques et quaternaires. Ces formations à caractère continental, ont comblé la vaste dépression paléozoïque.

On distingue de bas en haut :

- le continental indifférencié comprenant des grès, des sables et des argiles ;
- le Continental terminal essentiellement gréseux. Ces deux ensembles ont jusqu'à 100 mètres de puissance ;
- les formations quaternaires ; au niveau de la cuvette, elles sont caractérisées par des sables, des graviers, des argiles d'origine fluviale, des sables fins et argiles poudreuses d'origine éolienne, et des diatomites (au fond des lacs) ; au niveau des cours d'eau, elles sont constituées d'alluvions dont la largeur ne dépasse guère quelques kilomètres.

Aussi, la succession des mêmes formations s'observe au niveau du bassin versant du Bani et du Niger en amont de la cuvette lacustre.

Il n'y a donc pas a priori de différences significatives entre la nature du matériel détritique véhiculé par le Niger d'une part, et le Bani d'autre part.

2 ÉCHANTILLONNAGE ET MÉTHODE D'ÉTUDE

En dehors de la cuvette lacustre, les échantillons de sable ont été prélevés au niveau des berges du Niger entre Bamako et Ségou et des berges du Bani au niveau de Douna, San et Sofara.

Dans la cuvette lacustre, entre Mopti et Kona, les prélèvements ont été réalisés au niveau du chenal de basses eaux, tous les 5 km, à l'aide d'un cylindre de type Berthois.

Différentes caractéristiques des échantillons ont été déterminées : pourcentage de la fraction inférieure et supérieure à 50μ ; pourcentage de bioclastes ; granulométrie de la fraction sableuse. Ensuite, il a été procédé à une analyse morphoscopique des quartz de la fraction $500-630\mu$, une détermination des minéraux argileux aux RX et une détermination des cortèges minéralogiques lourds de la fraction $80-160\mu$, fraction qui s'avère contenir toutes les espèces minérales de l'échantillon (PARPENOFF et al., 1970).

3 CARACTÉRISTIQUES SÉDIMENTOLOGIQUES DE LA CHARGE DE FOND DE LA CUVETTE LACUSTRE ENTRE MOPTI ET KONA ET DE SES TRIBUTAIRES

3.1 DESCRIPTION GLOBALE DES ÉCHANTILLONS

De l'ensemble des caractéristiques globales des différents échantillons (tabl. I), il ressort que :

- les bioclastes, essentiellement des débris de coquilles de bivalves, apparaissent de façon très irrégulière et, à l'exception de deux échantillons prélevés à Ségou, sont limités à la cuvette lacustre ;
- par rapport à l'ensemble de l'échantillon, la quantité d'argilo-silts (fraction $< 50\mu$) fluctue sensiblement d'un échantillon à l'autre (de 0,22 à 3,83% dans la cuvette, de 0,01 à 8,48% pour le Bani et de 0,05 à 8,13 % pour le Niger en amont de la cuvette). Il apparaît toutefois que c'est dans la cuvette que cette fraction est régulièrement la plus faible : en moyenne, cette fraction est de 1,27 % dans la cuvette alors qu'elle est de 2,50 % dans chaque tributaire.

Ce résultat paradoxal, dans la mesure où le faible hydrodynamisme au niveau de la cuvette favorise les dépôts par décantation, vient du mode de prélèvement des échantillons ; suivant la configuration du lit du cours d'eau, les berges peuvent contenir des argilosilts déposés par décantation pendant la décrue. Dans le chenal, même en basses eaux, cette fraction est régulièrement remise en suspension et se dépose dans la plaine alluviale ;

Tableau I :

Description globale des échantillons

Nomenclature des échantillons. Nig = Niger : le nombre qui suit les lettres correspond pour le Niger au point kilométrique par rapport à son embouchure et pour le Bani au point kilométrique par rapport à la confluence avec le Niger

	n° Échantillon	localité	Coordonnées géographiques		% de la fraction >50 μ	% de la fraction <50 μ	% de bioclastes	% de mx lourds en Fil
			latitude	longitude				
C U V E T T E	NIG2901	Sanga Koulou	15° 00' 40" N	3° 54' W	99.56	0.44	0.00	0.58
	NIG2905	Djantakaye	14° 58' N	3° 55' W	99.03	0.84	0.14	0.58
	NIG2913	Koubi	14° 55' 20" N	3° 57' W	99.50	0.50	0.00	2.69
	NIG2919	Kotaka	14° 53' 30" N	4° 00' 30" W	96.76	3.24	0.00	2.09
	NIG2924	Batamani	14° 51' 20" N	4° 3' 30" W	99.78	0.22	0.00	4.58
	NIG2928	Sansé	14° 49' N	4° 5' 30" W	98.34	1.58	0.09	0.36
	NIG2937	Kamaka	14° 47' N	4° 5' 30" W	99.60	0.40	0.00	0.68
	NIG2942	Dakalondéma	14° 44' N	4° 6' W	99.61	0.39	0.00	3.01
	NIG2953	Némédé	14° 39' 40" N	4° 10' W	98.74	1.20	0.06	0.91
	NIG2961	Nimitogo	14° 35' 30" N	4° 11' W	98.16	0.37	1.48	0.95
	NIG2968	Nantaka	14° 32' 30" N	4° 12' 30" W	97.70	2.30	0.00	2.32
	NIG2977	Saré Séni	14° 29' N	4° 14' W	96.17	3.83	0.00	0.66
N I G E R	NIG3263A	Ségou	13° 27' N	6° 17' W	99.08	0.57	0.35	5.03
	NIG3263B	Ségou	13° 27' N	6° 17' W	99.75	0.05	0.20	5.63
	NIG3263C	Ségou	13° 27' N	6° 17' W	99.93	0.07	0.00	16.70
	NIG3371A	Kamini	13° 12' N	7° 7' W	92.84	7.16	0.00	8.87
	NIG3371B	Kamini	13° 12' N	7° 7' W	91.87	8.13	0.00	5.39
	NIG3402A	Dinan	13° 3' N	7° 20' W	99.63	0.37	0.00	3.60
	NIG3402B	Dinan	13° 3' N	7° 20' W	99.56	0.44	0.00	7.31
	NIG3433A	Koulikoro	12° 52' N	7° 33' W	97.62	2.38	0.00	6.29
	NIG3433B	Koulikoro	12° 52' N	7° 33' W	97.96	2.04	0.00	5.35
	NIG3462A	Tyenfala	12° 43' N	7° 45' W	94.96	5.04	0.00	46.97
	NIG3462B	Tyenfala	12° 43' N	7° 45' W	96.70	3.30	0.00	3.81
	NIG3462C	Tyenfala	12° 43' N	7° 45' W	99.34	0.66	0.00	44.73
B A N I	BANI 001	Mopti	14° 30' 20" N	4° 12' 10" W	96.88	1.07	2.05	2.28
	BANI002	Mopti	14° 30' N	4° 12' 10" W	98.39	1.61	0.00	1.41
	BANI074A	Sofara	14° 1' N	4° 15' W	98.00	2.00	0.00	2.63
	BANI074B	Sofara	14° 1' N	4° 15' W	91.52	8.48	0.00	0.31
	BANI074C	Sofara	14° 1' N	4° 15' W	99.99	0.01	0.00	0.55
	BANI195A	San	13° 23' N	4° 55' W	98.85	1.15	0.00	36.08
	BANI195B	San	13° 23' N	4° 55' W	96.87	3.13	0.00	19.45
	BANI195C	San	13° 23' N	4° 55' W	96.96	3.04	0.00	6.60
	BANI322A	Douna	13° 13' N	5° 54' W	97.23	2.77	0.00	3.37
	BANI322B	Douna	13° 13' N	5° 54' W	96.62	3.38	0.00	2.45
	BANI322C	Douna	13° 13' N	5° 54' W	99.14	0.86	0.00	1.81

- le pourcentage de minéraux lourds ($d > 2,89$) de la fraction FII (80-160 μ) est en moyenne faible pour les échantillons de la cuvette (1,60 %) et plus élevé pour les échantillons des tributaires (7 à 13 %).

Cette différence s'explique par la faible pente superficielle du Niger dans la cuvette (2 cm.km⁻¹ en hautes eaux) qui entraîne des vitesses maximales du courant en surface n'excédant pas 0,3 à 0,6 m.s⁻¹ dans les bras principaux (OLIVRY, 1992) et par conséquent une faible énergie de transport de la phase sableuse lourde.

3.2 ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE

La longue distance séparant les sites de prélèvement sur les tributaires ne permet pas de dégager une évolution précise de la granulométrie des sables en amont de la cuvette lacustre.

On peut toutefois noter qu'il y a peu de différences quant à la granulométrie des sables de la cuvette et de ses tributaires : dans la cuvette, la valeur moyenne de la médiane est de 0,60 mm ; dans les tributaires elle est de 0,61 mm (Niger) et de 0,57 mm (Bani) [tabl. II].

Les sables de la cuvette lacustre sont moins bien classés que ceux des tributaires : la valeur moyenne de C2 est de 25 % dans la cuvette, de 32,5 % pour le Niger supérieur et 36 % pour le Bani.

Cette diminution du classement est la traduction d'un mélange des sables apportés par le Niger et le Bani dans la cuvette.

Tableau 2 :

Caractéristiques granulométriques des sables de la cuvette lacustre, du Niger supérieur et du Bani.

Q1 : premier quartile ; MD : médiane ; Q3 : troisième quartile ; CS : centile supérieur ;

SO : indice de Trask ; C2 : indice de Bietlot-AFNOR ; SK : indice de skewness

(pour la définition de ces paramètres, cf CENSIER (1991)).

	Numéro de l'échantillon	Fractiles (en mm)				Indices de classement		dispersion
		Q1	MD	Q3	CS	SO	C2 (%)	
C U V E T T E	NIG2901	0.34	0.48	0.67	1.58	1.42	34.16	0.99
	NIG2905	0.25	0.93	1.62	4.35	2.55	14.97	0.68
	NIG2913	0.33	0.51	0.78	3.11	1.53	27.40	0.99
	NIG2919	0.29	0.51	0.94	2.97	1.81	19.09	1.02
	NIG2924	0.44	0.85	1.55	5.50	1.87	18.38	0.97
	NIG2928	0.34	0.50	0.72	1.57	1.46	30.72	1.00
	NIG2937	0.39	0.58	0.83	2.03	1.45	33.02	0.98
	NIG2942	0.38	0.59	1.30	15.12	1.85	24.31	1.19
	NIG2953	0.22	0.34	0.68	2.84	1.75	23.07	1.16
	NIG2961	0.73	1.18	1.60	3.79	1.48	33.07	0.92
	NIG2968	0.33	0.48	0.69	1.80	1.45	31.83	1.00
	NIG2977	0.16	0.28	0.60	1.61	1.92	12.92	1.09
N I G E R	NIG3263A	0.51	0.74	1.15	3.74	1.51	28.59	1.03
	NIG3263B	0.40	0.59	0.89	3.17	1.50	31.10	1.01
	NIG3263C	0.32	0.49	0.77	2.28	1.54	26.20	1.01
	NIG3371A	0.22	0.36	0.68	2.44	1.76	20.23	1.06
	NIG3371B	0.17	0.22	0.31	1.09	1.36	39.05	1.05
	NIG3402A	0.50	0.88	1.36	4.15	1.66	23.40	0.94
	NIG3402B	0.46	0.79	1.33	4.41	1.71	21.24	0.99
	NIG3433A	0.39	0.54	0.74	1.74	1.38	37.08	0.99
	NIG3433B	0.38	0.49	0.62	1.46	1.26	49.40	0.99
	NIG3462A	0.32	0.42	0.59	8.66	1.37	38.17	1.04
	NIG3462B	0.34	0.43	0.55	0.92	1.27	47.55	0.99
	NIG3462C	0.88	1.46	2.26	11.66	1.60	27.99	0.96
B A N I	BANI001	0.95	1.59	2.38	13.34	1.58	30.19	0.95
	BANI002	0.24	0.35	0.56	2.08	1.52	29.02	1.07
	BANI074A	0.16	0.20	0.28	10.74	1.31	45.27	1.05
	BANI074B	0.16	0.18	0.23	2.55	1.19	58.93	1.03
	BANI074C	0.16	0.19	0.23	0.45	1.21	56.68	1.02
	BANI195A	0.45	0.78	1.48	9.86	1.81	20.06	1.04
	BANI195B	0.27	0.47	1.16	9.17	2.07	18.57	1.20
	BANI195C	0.42	1.06	2.37	9.76	2.37	14.27	0.94
	BANI322A	0.35	0.44	0.55	0.91	1.26	50.53	1.00
	BANI322B	0.32	0.46	0.64	1.37	1.42	32.48	0.98
	BANI322C	0.47	0.63	0.82	1.54	1.32	44.30	0.99

3.3 ANALYSE MORPHOSCOPIQUE DES QUARTZ

La classification proposée dans le tableau III prend en compte les aspects de surface et la morphologie des grains (L. I.G.U.S, 1958).

Le pourcentage des grains luisants de tous les échantillons est élevé (de 56 à 86 %).

De l'amont vers l'aval, il y a une tendance à une diminution de ce pourcentage, certes, peu nette pour le Bani, et parallèlement une augmentation des grains picotés et sales ; l'augmentation régulière de l'indice d'émoissé montre que les sables subissent une usure au cours de leur transport (Fig. 2).

Tableau 3 :

Analyse morphoscopique des quartz.

IE : indice d'émoissé ; T : total ; A : anguleux ; SE : subémoissé ; E : émoissé ; O : ovoïde

	échantillon	% luisants					% picotés et sales					IE			
		T	A	SE	E	O	T	A	SE	E	O	T	E	O	
C U V E T T E	NIG2901	62	6	44	12		36	26	10			2		2	0.24
	NIG2905	46	10	26	10		50		42	8		4	2	2	0.23
	NIG2913	62	10	40	12		36	2	26	6	2	2	2		0.22
	NIG2919	72	16	42	12	2	26	2	18	4	2	2	2		0.22
	NIG2928	76	18	52	4	2	20		16	2	2	4	2	2	0.20
	NIG2942	60	14	34	12		36		26	8	2	4	2	2	0.23
	NIG2953	66	26	34	6		30	4	12	14		4	4		0.19
	NIG2968	66	18	34	14		34	2	18	14		0			0.22
	NIG2977	72	14	44	14		28	6	16	6		0			0.20
N I G E R	NIG3263B	64	20	40	4		36		28	8		0			0.18
	NIG3371B	80	20	50	10		20		14	6		0			0.19
	NIG3402B	70	38	26	6		30	4	14	12		0			0.15
	NIG3433B	86	36	40	10		14		8	6		0			0.16
	NIG3462B	82	40	40	2		18	8	10			0			0.11
B A N I	BANI001	56	12	38	6		40		30	6	4	4	4		0.22
	BANI002	80	16	52	12		18		14	2	2	2		2	0.21
	BANI074B	82	18	56	8		18		10	8		0			0.20
	BANI195C	68	8	50	8	2	32	6	24	2		0			0.20
	BANI322B	76	30	44	2		24	4	18	2		0			0.14

Les grains mats n'apparaissent que dans la cuvette lacustre, entre Mopti et Kona et dans le Bani juste en amont de la confluence avec le Niger.

L'augmentation du pourcentage de grains picotés et sales indique qu'il y a des apports de matériel issu du démantèlement des grès horizontaux. La présence des grains mats traduit des apports éoliens au niveau de la cuvette lacustre.

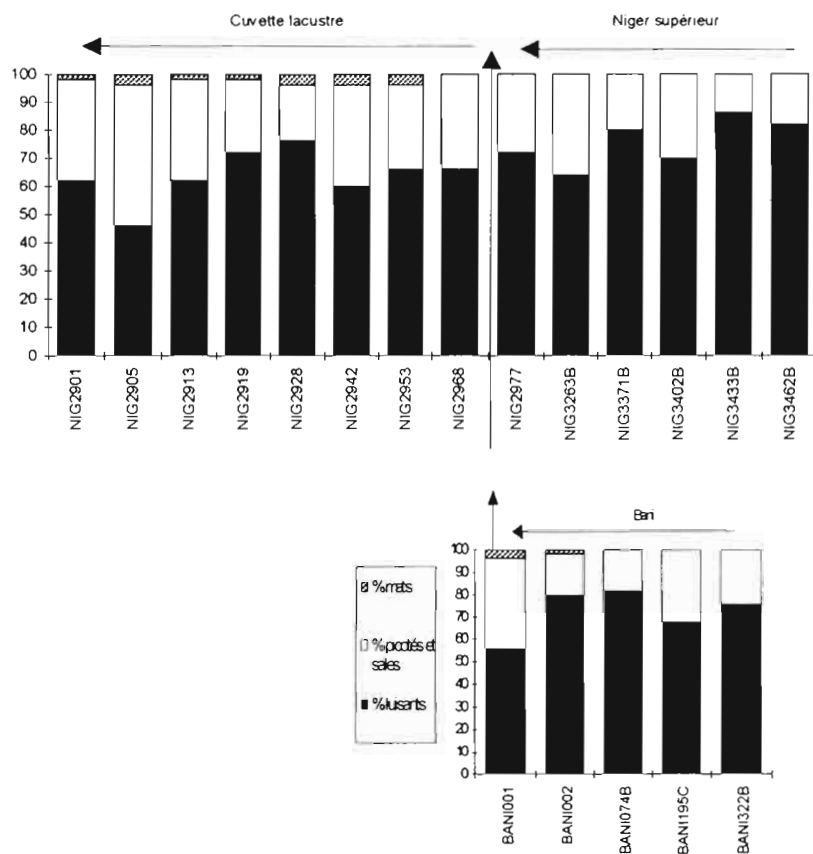


Figure n° 2
Évolution morphoscopique des sables du Niger et du Bani

3.4 ANALYSE DES MINÉRAUX LOURDS

Les sables de la cuvette lacustre et de ses tributaires contiennent les mêmes cortèges minéralogiques lourds (tabl. IV) : le zircon est présent en quantité moyenne ($> 30\%$) ; la tourmaline, la staurotide, la hornblende et les épidotes sont peu abondantes (de 10 à 30 %) ; l'andalousite, le disthène et le rutile sont rares (de 1 à 10 %) ; l'anatase, l'augite, le grenat, le zircon-hyacinthe, la sillimanite et le sphène ont été décelés (moins de 1%). Aucune tendance évolutive nette n'apparaît au niveau de chaque secteur étudié.

Cependant, les échantillons de la cuvette et du Bani sont en moyenne plus riches en andalousite, rutile, staurotide et tourmaline que ceux du Niger supérieur.

3.5 ANALYSE DES CORTÈGES ARGILEUX ET DES MINÉRAUX ASSOCIÉS

Les différents minéraux argileux et associés dans la fraction inférieure à 2μ ont été déterminés selon la méthode de diffraction des rayons X ; leur évaluation quantitative a été effectuée selon le principe préconisé par HOLTZAPFFEL (1985) (tabl. V).

A côté du quartz et de la goéthite présents dans la majorité des échantillons, les cortèges argileux se composent de kaolinite et d'illite dans le cours supérieur des tributaires de la cuvette (en moyenne 2/3 de kaolinite et 1/3 d'illite) ; la montmorillonite s'ajoute à ce cortège dans la cuvette et le cours inférieur de ses tributaires ; elle représente alors plus du tiers du cortège argileux.

Tableau 4 :

Les cortèges minéralogiques lourds des différents échantillons traités.

ANA : anatase ; AND : andalousite ; AUG : augite ; DIS : disthène ; EPI : épidotes ;
GRE : grenat ; HOR : hornblende ; HYA : hyacinthe ; HYP : hypersthène ; RUT : rutile ;
SIL : sillimanite ; SPH : sphène ; STA : staurotide ; TOU : tourmaline ; ZIR : zircon.

	échantillon	ANA	AND	AUG	DIS	EPI	GRE	HOR	HYA	HYP	RUT	SIL	SPH	STA	TOU	ZIR
C U V E T T E	NIG2901		7,5		1,5	9,5		18	0,5		2			17	34	11
	NIG2905	0,5	10		1	9,5		13	1		2,5	1		7	21	34
	NIG2913		8,5		2	5,5		4,5	0,5		7	0,5		20	21	31
	NIG2919		6,5	1	0,5	6	d	5			1	1	0,5	18	21	40
	NIG2924		4		1	5		3		0,5	2	1	1	18	16	50
	NIG2928		11		1	14	d	26			1,5	1		14	21	12
	NIG2937		6,5	0,5	2	9,5	0,5	10			1	0,5		16	21	33
	NIG2942		4		0,5	11		7	0,5		8	0,5	0,5	16	8,5	44
	NIG2953		6		3	7,5		2,5		0,5	5		0,5	8,5	28	39
	NIG2961		3		4	13		15			4		1	11	14	35
	NIG2968		3		3,5	16		11	0,5	0,5	2,5	0,5	0,5	18	14	31
	NIG2977		6,5		2	20	0,5	17			2,5	0,5		16	20	16
	moyenne	0	6,4	0,1	1,8	11	0,1	11	0,3	0,1	3,3	0,5	0,3	14,7	20	31,25
N I G E R	NIG3263A		0,5	0,5	6	26	1	15		1	3	1	1	10	7	28
	NIG3263B		0,5	0,5	1	16		14		1	1	0,5	1	12	6	47
	NIG3263C		1	1	1	17	2	5	1	1	4			8	6	53
	NIG3371A				1	14	d	3			2			9	1	70
	NIG3371B				3	19	d	5			d			12	10	51
	NIG3402A			2	6	19	1	23			2	2		8	14	23
	NIG3402B				3	18	1	18	1	3	3		1	21	6	25
	NIG3433A			2	1	23	1	28	1	7			2	13	12	10
	NIG3433B			1	2	19	2	20	1	1	2	2		13	7	30
	NIG3462A					16	d	2	6	1	1		1	1	2	70
	NIG3462B		1		2	16	1	22	4	1				8	11	34
	NIG3462C				1	16	d	2	3		1		1	3	1	72
	moyenne	0	0,2	0,6	2,3	18,3	0,8	13,1	1,4	1,3	1,6	0,6	0,4	9,8	6,9	42,71
B A N I	BANI001	0,5	8,5		1	3,5		2,5			3		0,5	15	18	48
	BANI002		10		0,5	12		11			3,5	1		26	24	14
	BANI074A		1		0,5	2			0,5		5,5			6	8,5	76
	BANI074B		3		0,5	3,5	d	1			8,5			5	25	54
	BANI074C		1,5		0,5	2,5		1			7	d		2	21	65
	BANI195A		6		1	4		1		1	7			7	11	62
	BANI195B		11			9		6			6			8	12	48
	BANI195C	1	19		2	10		4		d	4	1		19	14	26
	BANI322A		21	1		8		6		1	d	1	2	18	16	26
	BANI322B		15	1	1	4	1	11		2	1	d		23	34	7
	BANI322C		23	1	1	6	0,5	9,5		d	2			15	27	15
		moyenne	0,14	10,8	0,27	0,73	5,82	0,14	4,77	0,05	0,36	4,32	0,27	0,23	13,1	18,95

Tableau 5 :

Cortèges des minéraux argileux et minéraux associés de la fraction inférieure à 2μ .

	échantillon	% kaolinite	% illite	% montmorillonite	goethite	quartz
C U V ETTE	NIG2905	42	21	37	+	+
	NIG2924	40	22	38	+	+
	NIG2942	46	21	33	+	+
	NIG2961	50	21	29		+
	NIG2977	41	23	36	+	+
N I GER	NIG3263B	44	23	33	d	+
	NIG3371A	50	16	34	+	+
	NIG3462A	68	32		+	+
B A N I	BANI002	53	19	28	+	+
	BANI074B	64	36		+	+
	BANI195C	67	33		+	+
	BANI322A	70	30			+

4 ORIGINE DES SÉDIMENTS DÉTRITIQUES DE LA CUVETE LACUSTRE ENTRE MOPTI ET KONA

4.1 LES APPORTS FLUVIATIILES

4.1.1 La fraction sableuse

L'étude de la granulométrie des sables de la cuvette montre qu'ils résultent d'un mélange des sables apportés par le Bani et le Niger.

De l'analyse morphoscopique des quartz, il ressort que ces sables sont issus pour partie du démantèlement des grès horizontaux précambriens et pour partie du démantèlement des formations granito-gneissiques et des formations birrimiennes situées vers l'amont des bassins du Niger et du Bani. La légère augmentation du pourcentage de grains picotés et sales de l'amont vers l'aval des tributaires indique que le démantèlement des formations gréseuses doit se poursuivre sur la majeure partie des bassins du Niger et du Bani en contact avec ces formations.

La pente du Niger est de 1 m.km^{-1} à l'aval de Bamako, de 10 cm.km^{-1} à Koulikoro, puis de 7 cm.km^{-1} à Tamani et enfin de 2 cm.km^{-1} vers Ségou (BRUNET-MORET et al., 1986).

D'après les données morphoscopiques, on peut admettre que le Niger a une force érosive de son lit suffisante jusque dans le secteur de Koulikoro.

De Douna jusqu'à la confluence avec le Niger, le Bani a une pente faible de l'ordre de 2 cm.km^{-1} ; il ne peut donc creuser son lit à ce niveau.

Les apports détritiques par démantèlement des grès horizontaux proviennent des affluents de rive droite du Bani entre San et Mopti. Ces affluents prennent leur source dans la série de collines gréseuses orientées NNE-SSW et constituant la bordure orientale de la cuvette lacustre.

L'analyse des minéraux lourds des différents sables permet de préciser la contribution relative des bassins du Niger supérieur et du Bani aux apports détritiques dans la cuvette lacustre.

Les données minéralogiques ont été traitées par analyse factorielle des correspondances (AFC), qui est une méthode statistique multivariée descriptive (BENZEKRI et BENZEKRI, 1980 ; DE LAGARDE, 1983).

Le premier plan factoriel traduit 69,6 % de la variance totale, 41,3 % pour le premier axe et 28,3 % pour de le second axe (Fig. 3).

L'axe 1 est défini par la hornblende, l'andalousite et la tourmaline ayant respectivement une contribution relative de 16 %, 10 % et 9 %, à coordonnée positive et opposées au zircon ayant une contribution relative de 51 %, à coordonnée négative.

L'axe 2 est défini par les épidotes (20 %) et la hornblende (20 %), à coordonnée positive et opposées à l'andalousite (27 %) et la tourmaline (14 %), à coordonnée négative.

Les autres minéraux n'interviennent pas de façon significative dans la définition des deux premiers axes factoriels.

La distribution des points échantillons dans ce premier plan factoriel montre que les sables du Niger supérieur et du Bani se répartissent selon deux nuages distincts ; leur position fait clairement ressortir les différences quantitatives de leur cortège minéralogique.

Le nuage de points échantillons de la cuvette lacustre est réduit, ce qui indique que les cortèges minéralogiques des sables de la cuvette sont relativement homogènes.

Le chevauchement des nuages définis par les échantillons du Bani et ceux de la cuvette révèle que les sables de la cuvette sont minéralogiquement plus proches de ceux du Bani que de ceux du Niger supérieur.

Le Bani représente donc la principale source d'apports détritiques dans la cuvette lacustre.

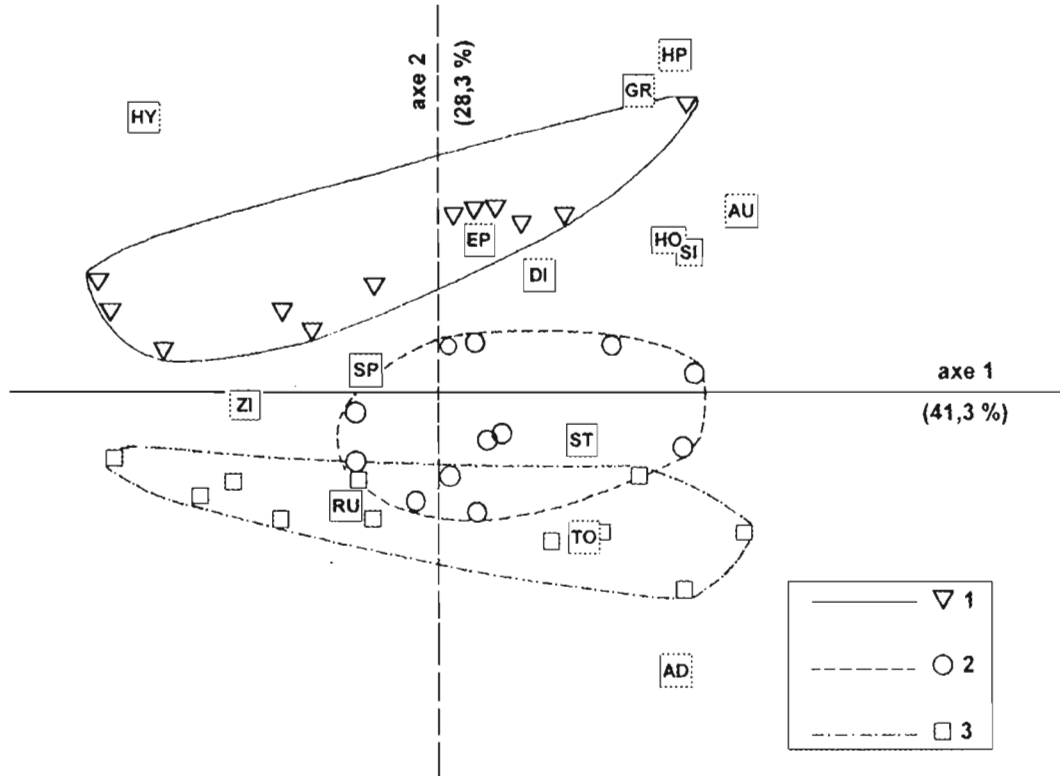


Figure n° 2

Traitement des données minéralogiques par analyse factorielle des correspondances (AFC)

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

Etant donné le faible module spécifique du Bani ($4,12 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-1}$) par rapport à celui du Niger supérieur ($11,2 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-1}$) et étant donné sa faible pente (2 cm.km^{-1}), ce résultat ne peut s'expliquer qu'en admettant que le matériel détritique a une origine proche et localisée aux grès précambriens qui constituent la bordure orientale de la cuvette lacustre ; d'autres apports dans la cuvette sont possibles par l'intermédiaire de l'Yame qui se jette dans le Niger entre Mopti et Kona, et qui prend sa source dans le massif de Bandiagara

4.1.2 La fraction argileuse

De l'amont vers l'aval du Niger et du Bani, l'évolution de la composition du cortège argileux de la charge de fond est en accord avec la séquence climatique des associations géochimiques tropicales définie par BOCQUIER (1973).

L'illite et la kaolinite constituent l'héritage détritique des sols des bassins supérieurs du Niger et du Bani sous climat tropical humide.

La montmorillonite n'apparaît que dans les sédiments évoluant dans le domaine sahélien, zone climatique où il y a néoformation de montmorillonite par bisiallisation

(PEDRO, 1968). On retrouve ainsi la même évolution minéralogique que celle observée au niveau du bassin du lac Tchad (GAC, 1980).

4.2 LES APPORTS ET REMANIEMENTS ÉOLIENS

Les grains ronds mats, témoins d'un transport éolien n'ont été décelés que dans les sables de la cuvette lacustre (Fig. 2). Les pourcentages relevés sont apparents et les apports éoliens sous-estimés ; d'une part, la fraction examinée (500-630 μ) n'est pas représentative de l'ensemble de l'apport éolien, d'autre part, des grains ovoïdes luisants peuvent correspondre à d'anciens grains mats repris en milieu fluvial ; seul, un examen exoscopique permet de déceler ce type de grains.

L'aspect mat étant le résultat d'une longue usure des grains par chocs sous l'effet du vent, la fraction d'origine éolienne du matériel détritique de la cuvette doit probablement provenir de la déflation des grands ergs situés au nord de la cuvette et avoir été transportée par l'Harmattan.

Dans la partie centrale de la cuvette, des apports éoliens dus à l'Harmattan sont connus (BRUNET-MORET et al., 1986) ; ils sont constitués de sables fins et d'argiles poudreuses et encomrent le relief de la cuvette. Ces éléments fins, par remaniement éolien, colmatent le fond de la cuvette centrale.

Aucune précision ne peut être donnée quant au pourcentage de poussières éoliennes apportées dans la partie supérieure de la cuvette.

On peut seulement noter que, si on fait abstraction de la montmorillonite climato-dépendante, le pourcentage d'illite a tendance à légèrement augmenter par rapport à la kaolinite lorsque l'on passe des tributaires à la cuvette lacustre ; cette augmentation pourrait correspondre à un apport de l'Harmattan dans la mesure où il a été montré que plus le trajet par le vent est long, plus le pourcentage d'illite dans les poussières a tendance à augmenter (PAQUET et al., 1984).

CONCLUSION

C'est la juxtaposition des résultats des différentes analyses sédimentologiques qui permet de préciser l'origine et la dynamique des apports détritiques terrigènes dans la partie supérieure de la cuvette lacustre du Niger.

C'est le Bani qui apporte la plus grande partie du matériel détritique dans la partie supérieure de la cuvette lacustre ; ce matériel provient principalement du démantèlement des grès horizontaux précambriens situés autour de la cuvette, et du démantèlement des formations granito-gneissiques et birrimiennes qui constituent le soubassement de la partie supérieure du bassin du Bani et du Niger.

La fraction d'origine éolienne correspond très probablement à un matériel issu de la déflation des grands ergs du Nord de la cuvette et transporté par l'Harmattan. Toutefois, l'ensemble des apports éoliens (sables et argilo-silts) reste très limité (\approx 5%) dans la partie supérieure de la cuvette.

La poursuite de l'échantillonnage dans les autres parties de la cuvette permettra de préciser les autres sources éventuelles de matériel détritique et la dynamique d'une charge de fond évoluant en milieu fluvio-lacustre sahélien.

BIBLIOGRAPHIE

- BASSOT J.P., MELOUX J. & TRAORE H. - 1981 - Notice explicative de la carte géologique à 1/1 500 000 de la République du Mali. BRGM Ed., Dir. Nat. de la Géol. et Mines du Mali.
- BENZECRI J.P., BENZECRI F. - 1980 - Pratique de l'analyse de données. Tome I : analyse des correspondances. Exposé élémentaire. Dunod Ed. (Paris), 424 p.
- BOCQUIER G. - 1973 - Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Interprétation géodynamique. Mémoire ORSTOM n° 62, 350 p.
- BRUNET-MORET Y., CHAPERON P., LAMAGAT J.P., MOLINIER M. - 1986 - Monographie hydrologique du fleuve Niger. Editions de l'ORSTOM, coll. Monographies hydrologiques, n° 8, Tome I : Niger supérieur, 396 p. ; Tome II : Cuvette lacustre et Niger moyen, 506 p.
- GAC J.Y. - 1980 - Géochimie du bassin du lac Tchad - Trav. et doc. de l'ORSTOM, n° 123, 251 p.
- HOLTZAPFFEL T. - 1985 - Les minéraux argileux - Préparation, analyse diffractométrique et détermination. Soc. Géol. du Nord, Villeneuve d'Asq, publ. n° 12, 136 p.
- LAGARDE (de) J. - 1983 - Initiation à l'analyse de données. Dunod Ed. (Paris), 158 p.
- L.I.G.U.S. - 1958 - Méthode améliorée pour l'étude des sables - Rev. Géomorph. Dyn. vol. 9, pp. 43-54
- OLIVRY J.C. - 1992 - Le contexte hydroclimatique de la cuvette lacustre. Rapport inédit, ORSTOM Bamako (Mali), 13 p., 15 fig. et 7 tabl.
- PAQUET H., COUDE-GAUSSEN G., ROGNON P. - 1984 - Etude minéralogique de poussières sahariennes le long d'un itinéraire entre 19° et 35° de latitude nord. Rev. Géol. Dyn. et Géogr. Phys., vol. 25, fasc. 4, pp. 257-265
- PARFENOFF A., POMEROL C., TOURENQ J. - 1970 - Les minéraux en grains. Méthodes d'étude et de détermination. Masson Ed. (Paris), 578 p.
- PEDRO G. - 1968 - Distribution des principaux types d'altération chimique à la surface du globe. Présentation d'une esquisse géographique. Rev. Géol. Dyn. et Géogr. Phys., vol 10, fasc. 5, pp. 457-470

CHANGEMENT CLIMATIQUE AU MALI ET TENDANCE A LA DESERTIFICATION

M. DIALLO IAM, C. H. KONDE, F. TRAORE et M. L. FOFANA

RESUME :

La présente étude fait partie d'un programme global de recherche sur la désertification liée aux changements climatiques au Mali.

Le paramètre climatique considéré ici est la température moyenne relevée sur 30 ans. On procède au suivi des décades les plus représentatives de la saison sèche et de la saison humide pour identifier une tendance quelconque. Ici une hausse ou une baisse. Des résultats de l'analyse des températures moyennes il apparaît une nette tendance à la hausse pendant les 3 dernières décennies.

1 INTRODUCTION:

Depuis déjà trois décennies le Mali, comme l'ensemble du Sahel, connaît des épisodes sévères de variations climatiques qui n'ont pas laissé le temps à nos différents écosystèmes de revenir à leur équilibre d'antan. Graduellement, il s'est instauré une austérité climatique aux effets dévastateurs : déficits pluviométriques chroniques entraînant la famine, l'exode et la mort pour les hommes et les bêtes, réactivation des dunes de sable dans tout le Sahel Nord du Mali, etc...

Ici nous entendons par désertification et par sahélisation une tendance à la pérennisation des conditions climatiques austères du Sahara et du Sahel dans les zones climatiques voisines plus au Sud. Nous n'entrerons pas dans les grandes discussions savamment menées par Odingo, (1990) à propos des différentes définitions de la désertification et de toute la stratégie de lutte bâtie par le BNUS/UNSO autour.

Nous avons souvent utilisé le terme d'exportation par le Sahara de flux de poussières atmosphériques, de dunes de sable et de chaleur vers les zones climatiques voisines à savoir le Sahel, la Savane Soudanaise et l'Océan Atlantique, (Diallo Iam, 1989).

La base de temps est ramenée à l'échelle d'une vie humaine. L'analyse des différents résultats montrent une péjoration du climat sur les trois décennies étudiées. Les moyennes décennales des températures moyennes ont augmenté presque régulièrement de 1961 à 1990 pour toutes les stations étudiées.

Le projet de recherche « Aérosols Sahéliens et Désertification » qui s'occupe de l'exécution du programme global cité plus haut a été conjointement mené par l'Equipe de Géophysique Externe (EGE), du Département de Physique - chimie de l'Ecole Normale supérieure de Bamako (DER de PC/ENSUP) et par une équipe canadienne du Geography Department, University of Guelph, Ontario, sur un financement du CRDI à Ottawa, Canada.

De Novembre 1988 à Novembre 1992, les deux équipes ont installé et exploité trois stations fixes dans le Delta Intérieur du fleuve Niger (DIN) pour mesurer dans les 10 premiers mètres de la couche limite planétaire : le profil vertical de la température et du vecteur vent, les valeurs instantanées de la concentration des aérosols désertiques et sahéliens, de l'humidité relative et du rayonnement global.

Un tunnel aérodynamique a aussi été utilisé pour mesurer la susceptibilité des sols à émettre des aérosols dans les conditions naturelles du Sahel et des échantillons de poussières ont été prélevés par pompage sur filtres Gellman pour des analyses chimiques.

La phase active est terminée et nous sommes actuellement occupés au dépouillement des données.

Le présent travail est un pré-requis pour nous, les séries temporelles de la météorologie étant plus longues que les nôtres nous avons débuté par leur analyse pour situer le contexte climatique dans lequel nous avons travaillé.

2 METHODES ET RESULTATS :

Il est possible de paramétriser le processus de la désertification par un choix judicieux de variables fondamentales orientées vers des objectifs précis préétablis (Diallo Iam, 1989; Odingo, 1990; Kharin, 1990 et BNUS/UNSO, 1992).

Par exemple, le sujet de la désertification bien qu'étant fondamental pour tous ne sera pas abordé de la même façon par un agronome du DIN, confronté à la fuite des sols, par un sociologue s'intéressant aux conséquences désastreuses du phénomène sur les populations nomades, semi nomades et sédentaires ou par un physicien de l'atmosphère. Chacun d'eux pourra définir un protocole d'étude comprenant un ensemble de paramètres fondamentaux et de variables secondaires.

EXEMPLES DE PROTOCOLES :

Exemple 1: Effets socio-économiques de la désertification sur les populations du DIN. Un protocole approprié pour un sociologue pourrait contenir :

- - quelques paramètres climatiques tels que la température moyenne et la pluviométrie,
- - des indicateurs socio-économiques de la région d'intérêt,
- - des données éthno-démographiques.

Exemple 2: Processus de la désertification étudié par un scientifique. Ici le protocole s'attaquant à ce problème pourrait être constitué de plusieurs matières indépendantes. Mais quel que soit la forme adoptée par le scientifique, le dit protocole doit néanmoins contenir des paramètres fondamentaux tels que:

- - La température et son profil vertical
- - La pluviométrie, l'humidité relative, l'ETP
- - Le rayonnement global
- - Le vecteur vent et son gradient
- - La concentration en aérosols
- - Les dunes de sables et la dynamique des dunes.
- - La susceptibilité d'émission des aérosols par les sols
- - La disponibilité en eau de surface en ha.km⁻², etc ...

Les paramètres soulignés ci-dessus sont ceux que l'EGE a choisis pour mener son étude globale sur la désertification.

L'analyse des grandes tendances du processus de la désertification que l'on ne peut tirer que des longues séries temporelles de la Météorologie Nationale, est un pré-requis pour l'EGE avant de formuler ses conclusions sur la période étudiée de 1988 à 1992. comme dans l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest le climat du Mali est déterminé par les oscillations de la Zone de Convergence Inter Tropicale (ZCIT) entre le Golfe de Guinée et le Sahara. Il en est résulté trois zones climatiques principales au Mali: la zone Soudanaise ou Soudano-guinéenne, la zone Sahélienne, et le Sahara. ces zones sont traversées transversalement par la ZCIT. Les isohyètes sont parallèles aux latitudes et

décroissent du sud au nord. Deux saisons principales sont connues au Mali, la saison sèche et la saison pluvieuse dont les longueurs, anticorrelées entre elles, varient du Sud au Nord. (Bulletins Agrométéorologiques de la Météorologie Nationale du Mali; Sivakumar et al, 1984).

Les stations météorologiques sont choisies dans ces différentes zones climatiques et des séries de 30 ans sont analysées (à l'exception de Bamako-Sénou où nous n'avons pu disposer que de 16 ans de données). Le traitement qui suit concerne uniquement les données déjà disponibles sur support informatique gracieusement fournies par la Météorologie Nationale. Nous avons choisi les décades les plus représentatives des saisons et nous les avons suivi sur 16 ou 30 ans. Signalons que les mois les plus chauds pour la saison sèche sont avril et mai et pour la saison humide août.

Le déficit pluviométrique lui, est bien discuté dans la littérature. (Sivakumar et al, 1984; Odingo, 1990 et Direction de la Météorologie Nationale du Mali).

Nous avons ensuite calculé et tracé les valeurs des moyennes décennales pour une même décennie et pour un même mois de 1961 à 1990, les moyennes mobiles décennales obtenues par lissage polynomial pour la même période et pour les différentes stations d'étude (Fig. 4 et 5). Pour fixer les idées, la figure 1 représente en tiret les moyennes décennales des températures moyennes de la première décennie du mois de mai de 1961 à 1990, en pointillé la moyenne mobile simple des moyennes décennales et en trait plein la moyenne arithmétique des mêmes moyennes décennales des températures moyennes pour la station de Mopti Sévaré (code 270060).

Nous avons tracé dans un repère unique à la figure 2 et pour la température moyenne toujours, les fluctuations des moyennes décennales en tiret,, celles de la moyenne mobile obtenue par lissage polynomial en trait plein et la moyenne arithmétique. Les amplitudes des fluctuations que nous avons observées vont de 2 à 5 degrés Celsius selon les saisons et bien entendu selon la latitude des stations. La distance de la côte atlantique à une station donnée pouvant être considérée comme directement proportionnelle à la quantité de pluie recueillie à la dite station. Les occurrences d'amplitude les plus courantes se situent aux environs de 3 à 4 degrés Celsius. Les moyennes mobiles obtenues par lissage polynomial suivent mieux les fluctuations des normales tout en conservant la tendance générale à la hausse mentionnée plus haut comme on le voit sur la figure 2. C'est la raison pour laquelle nous nous sommes limités à ces courbes pour les autres stations.

La plupart des troisièmes décennales sont bien représentatives de leur saison et des hausses observées, comme si la saison prenait le temps de s'installer confortablement, mais ceci reste à être confirmé par l'analyse statistique des décennales chaudes et froides qui fera l'objet d'une autre publication de l'EGE.

Puisque les mois d'avril et de mai d'une part, et d'août de l'autre, sont les plus chauds de leur saison respective, on a axé l'attention sur leurs décennales. Cependant nous avons également étudié celles de juillet et de septembre à cause de leur nature pluvieuse et aussi à cause du glissement latéral de la saison humide elle même d'une année à l'autre. Il est ensuite prévu de faire la part des choses en traçant la pluviométrie et le vecteur vent pour ces mêmes décennales pour bien voir leur effet, ces deux paramètres pouvant entraîner des variations considérables de la température moyenne.

En annexe se trouvent les différents tableaux et graphiques. Nous aboutissons à une hausse des températures moyennes comme trouvé aussi par Obasi, (1988) sans préjuger de son origine anthropogénique ou naturelle.

En effet Obasi, (1988) montre que sur la base de températures moyennes mesurées à l'échelle mondiale on a trouvé une tendance nette à la hausse comme d'ailleurs prévu par

les différents modèles mathématiques. On retrouve les mêmes conclusions générales chez Budyko, (1991) quand il dit que la température moyenne a crû de 0,3°C par décennie de 1975 à 1989. Nous ne le suivons pas non plus, dans le cadre de cette étude, quand lui aussi affirme que cette augmentation, serait due à l'effet de serre d'origine anthropogénique. Pour autant nous ne pouvons pas dire que cet effet n'intervient pas comme un des facteurs clés du réchauffement global.

Houghton, (1991) trouve la même tendance à la hausse de la température sur les 100 dernières années. Hausse qu'il situe entre 0.3 et 0.6 °C avec les années les plus chaudes dans la décennie 1980-1990. Notons que les valeurs trouvées par Obasi Budyko et Houghton s'appliquent à l'ensemble du globe terrestre et pour une série chronologique de 100 ans tandis que les nôtres ne concernent que quelques stations du Mali et pour une période plus courte.

3 CONCLUSIONS :

L'analyse menée sur les décades des températures moyennes a abouti à une augmentation de celles-ci au cours des trente dernières années. Le processus de la désertification est au coeur de cette tendance. Mais il importe de faire une analyse globale en prenant en compte les autres paramètres. Par ailleurs une analyse plus fine fera le décompte des décades plus chaudes ou plus froides qu'une décade "unité" caractérisée par sa température moyenne égale à la moyenne des moyennes décennales pour un mois et une décennie donnés.

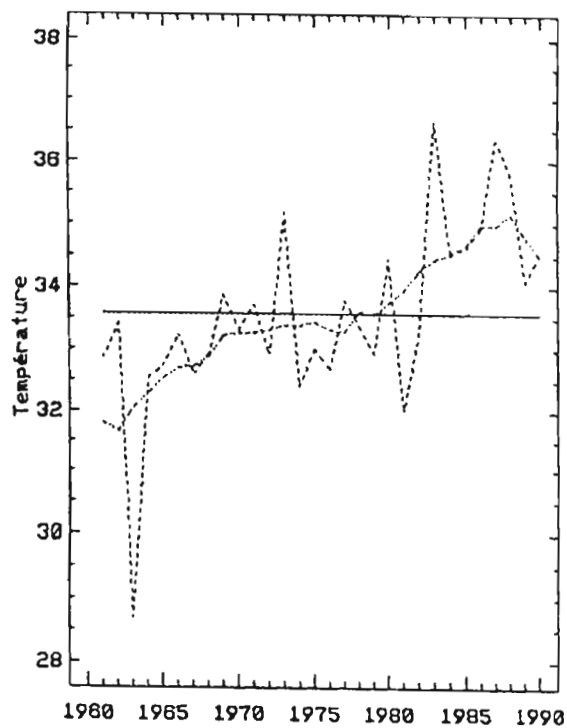
REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient très sincèrement le CRDI pour son soutien financier pendant 5 ans à travers la 03-P-86-1045 et la Direction Générale de la Météorologie Nationale du Mali pour la disponibilité des données prétraitées et saisies sur disquettes.

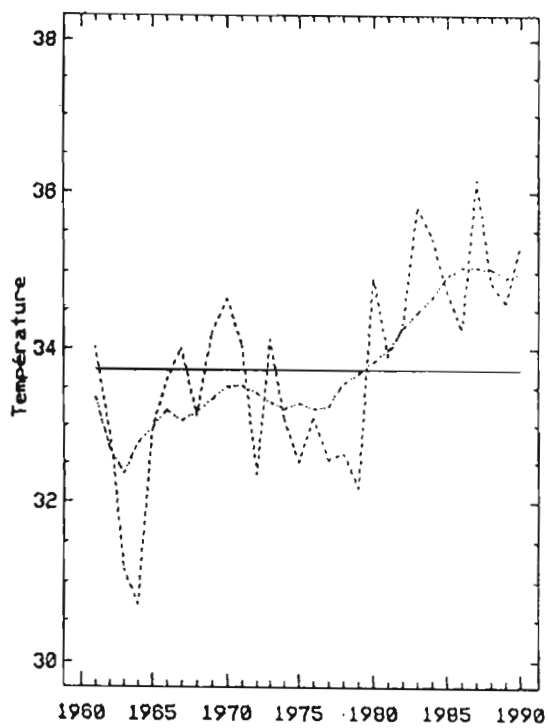
REFERENCES

- BUDYKO M. I., 1991 : climate prediction based on past and present analogues. Pages 225-229 in proceedings of the Second World climate conference, October-November 1990, Geneva, Switzerland.
- BNUS/PNUD, 1992, Evaluation de la désertification et de la sécheresse dans la région Soudano-sahélienne, BNUS, pp 1-5.
- DIALLO IAM M., 1989, Possibilité d'une paramétrisation scientifique du processus de la désertification et de sahélanisation. Pages 267-271, in proceedings of Disastri Ambientali e Desertificazione, Atti del convegno Internazionale 6-7 Giugno 1989, Palermo, Italia. Faenza V. e Randazzo D., Università degli Studi, Dipartimento di Scienze Politiche, Sezione Deserti e Desertificazione, Trieste.
- HOUGHTON J.T., 1991, Scientific Assessment of Climate change: Summary of the IPCC Working Group I Report. Pages 23-45 in Proceedings of The Second climate conference, October-November 1990, Geneva, Switzerland: WMO/OMM.
- KHARIN N. G. 1990, Recommendations on application in the sahelian zone of FAO/UNEP provisional methodology for Desertification assessment and mapping, in Odongo R. S., Desertification Revisited.
- Météorologie Nationale du Mali. 1987-1992 : Bulletins Agrométéorologiques, (Edition Décennale). Bamako Mali, Direction Générale de la Météorologie Nationale.

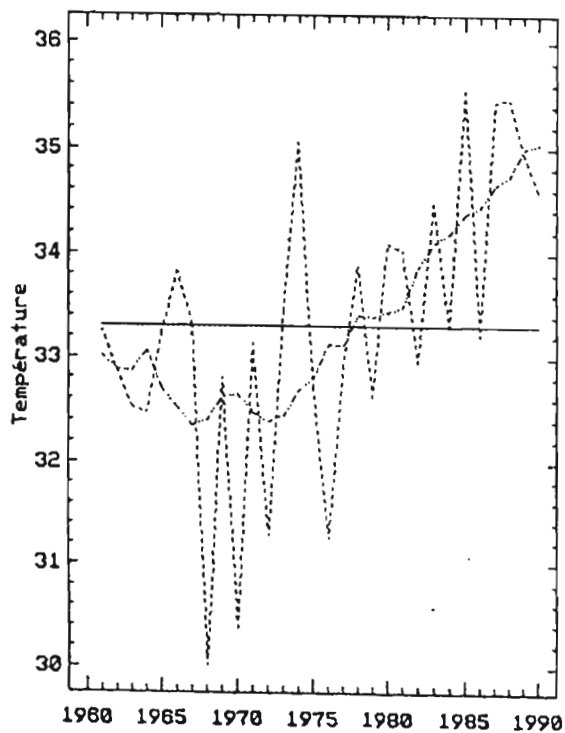
- OBASI G.O.P., 1988, International co-operation in Atmospheric Sciences and the changing Atmosphere. Pages 140-158 in Proceedings of the conference on the changing Atmosphere, Implications for Global Security, 27-30 June 1988, Toronto, Canada: WMO/OMM-N°710.
- ODINGO R. S. 1990, The Definition of Desertification: Its programmatic consequences for UNEF and international community, Desertification control bulletin of UNEF 18:31-50.
- ODINGO R. S. 1990, Desertification Revisited. Pages 7-44 in proceedings of an Ad Hoc consultative Meeting on the Assessment of Desertification, UNEF-DC/FAC, Feb 1990, Nairobi, Kenya : UNEP
- SIVAKUMAR M. V. K., KONATE M., VIRMINI, Déc. 1984, Agroclimatologie de l'Afrique de l'Ouest : le Mali, ICRISAT, Patancheru, Inde.



a) Décade 1



b) Décade 2



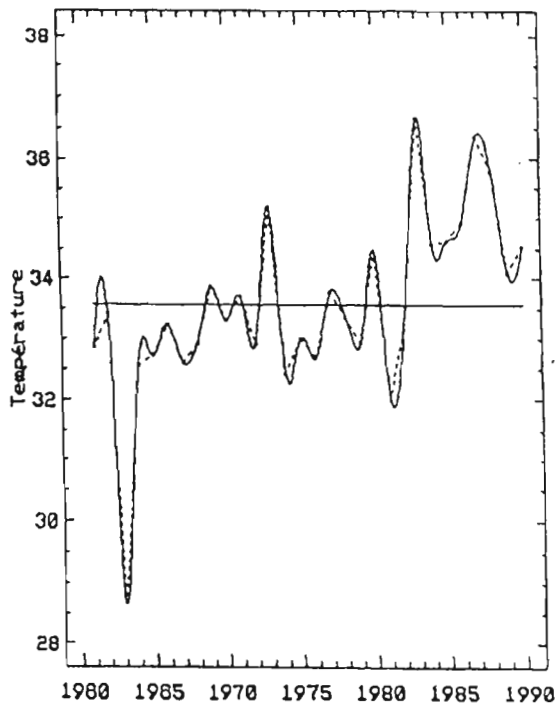
c) Décade 3

Figure n° 1
Température moyenne de mai à Mopti

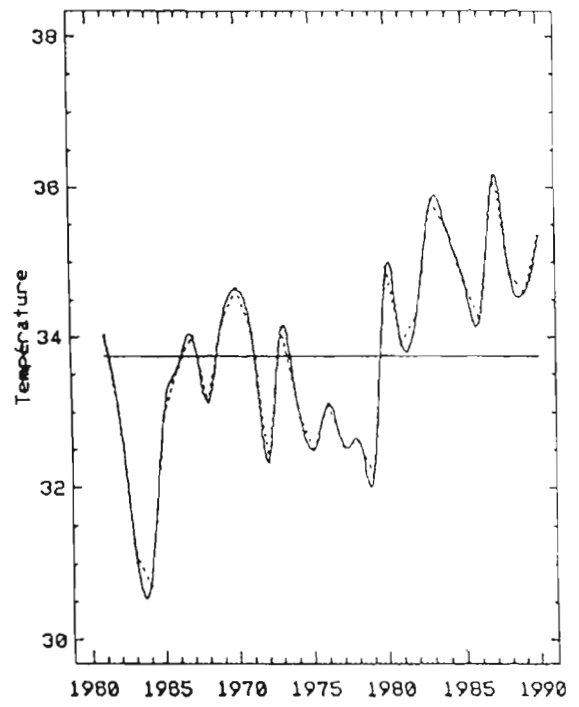
Tableau 1

Températures décennales à Mopti

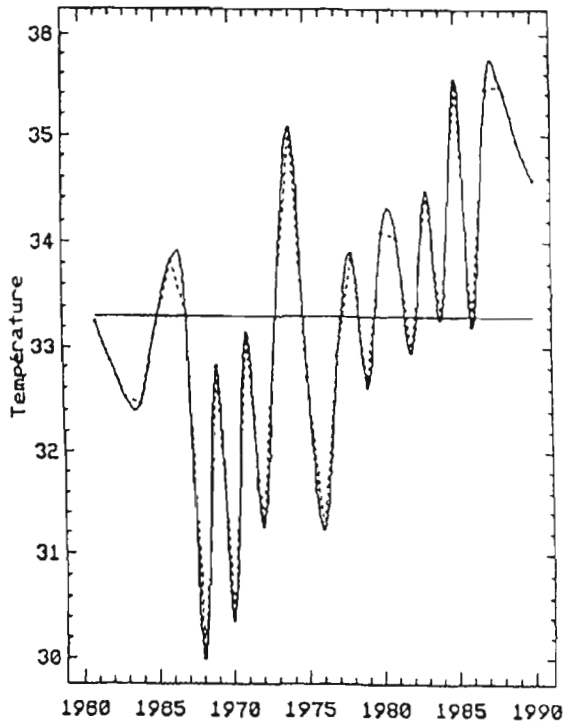
ANNEE	Décad1	Décad2	Décad3
1961	32.86	34.01	33.24
1962	33.41	32.89	32.86
1963	28.66	31.17	32.51
1964	32.55	30.72	32.46
1965	32.72	32.94	33.22
1966	33.24	33.60	33.82
1967	32.61	34.01	33.30
1968	32.91	33.14	30.00
1969	33.86	34.19	32.80
1970	33.32	34.65	30.38
1971	33.71	34.05	33.13
1972	32.92	32.35	31.26
1973	35.17	34.13	33.45
1974	32.42	33.09	35.05
1975	33.00	32.50	32.70
1976	32.69	33.12	31.24
1977	33.79	32.55	32.91
1978	33.36	32.63	33.89
1979	32.93	32.19	32.62
1980	34.45	34.93	34.09
1981	32.00	33.90	34.03
1982	33.25	34.31	32.95
1983	36.66	35.82	34.46
1984	34.56	35.41	33.30
1985	34.61	34.75	35.54
1986	34.93	34.25	33.20
1987	36.36	36.16	35.44
1988	35.80	34.84	35.47
1989	34.10	34.60	34.94
1990	34.52	35.34	34.58



a) Décade 1



b) Décade 2



c) Décade 3

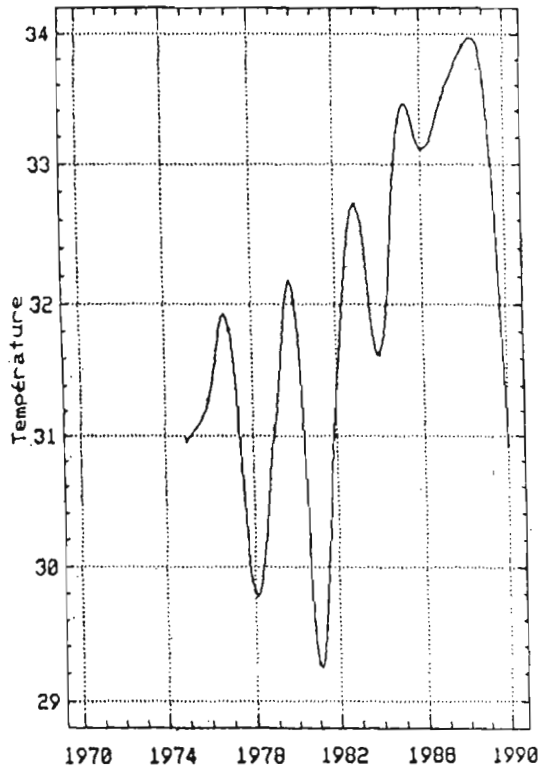
Tableau 1

Températures décennales à Mopti

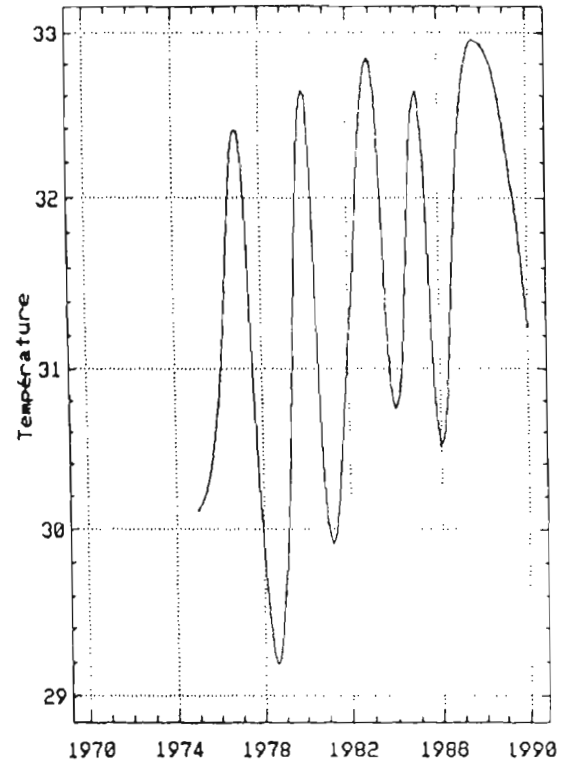
ANNEE	Décad1	Décad2	Décad3
1961	32.86	34.01	33.24
1962	33.41	32.89	32.86
1963	28.66	31.17	32.51
1964	32.55	30.72	32.46
1965	32.72	32.94	33.22
1966	33.24	33.60	33.82
1967	32.61	34.01	33.30
1968	32.91	33.14	30.00
1969	33.86	34.19	32.80
1970	33.32	34.65	30.38
1971	33.71	34.05	33.13
1972	32.92	32.35	31.26
1973	35.17	34.13	33.45
1974	32.42	33.09	35.05
1975	33.00	32.50	32.70
1976	32.69	33.12	31.24
1977	33.79	32.55	32.91
1978	33.36	32.63	33.89
1979	32.93	32.19	32.62
1980	34.45	34.93	34.09
1981	32.00	33.90	34.03
1982	33.25	34.31	32.95
1983	36.66	35.82	34.46
1984	34.56	35.41	33.30
1985	34.61	34.75	35.54
1986	34.93	34.25	33.20
1987	36.36	36.16	35.44
1988	35.80	34.84	35.47
1989	34.10	34.60	34.94
1990	34.52	35.34	34.58

Figure n° 2

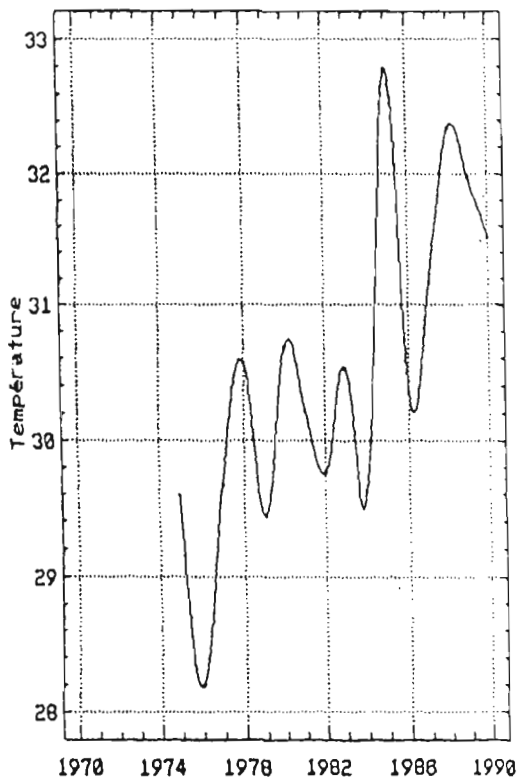
Température moyenne de mai à Mopti



a) Décade 1



b) Décade 2

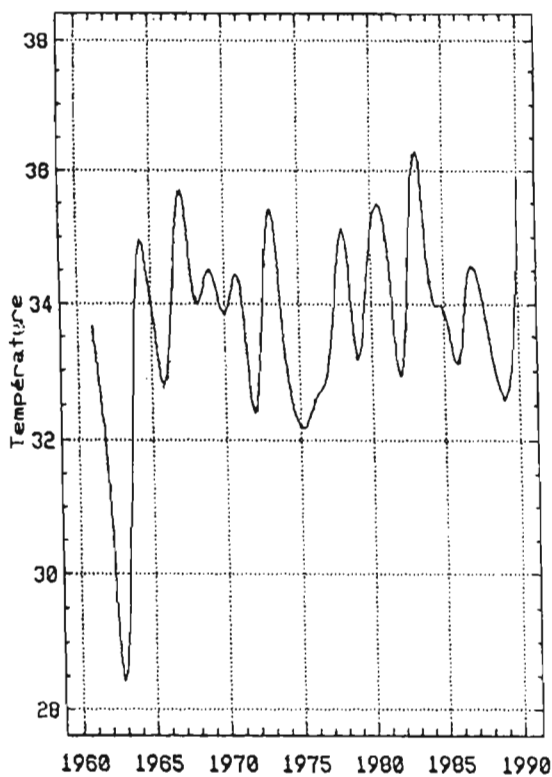


c) Décade 3

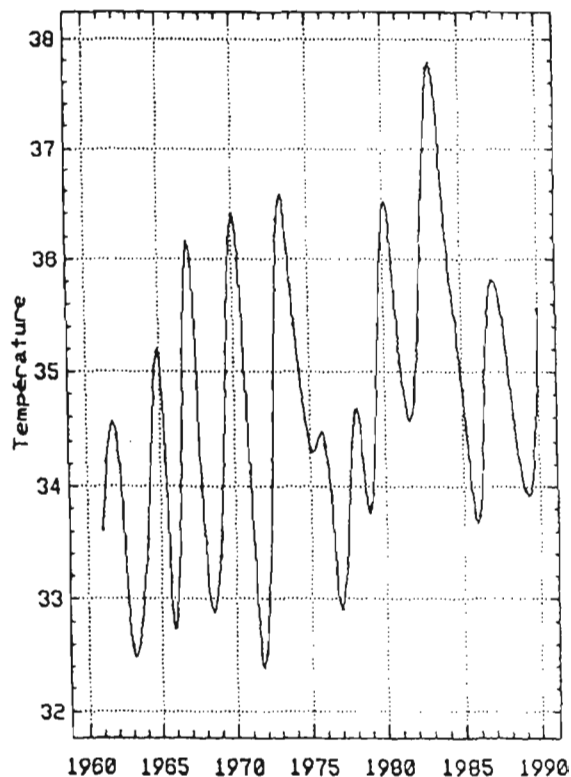
Tableau 2
Températures décadaires à Bamako

ANNEE	Décad1	Décad2	Décad3
1975	30.96	30.12	29.59
1976	31.28	30.78	28.20
1977	31.82	32.38	29.67
1978	29.82	29.94	30.57
1979	31.05	29.56	29.44
1980	32.03	32.63	30.69
1981	29.27	30.04	30.21
1982	31.41	31.20	29.77
1983	32.71	32.82	30.52
1984	31.64	30.75	29.62
1985	33.33	32.62	32.78
1986	33.12	30.52	30.35
1987	33.50	32.51	31.17
1988	33.90	32.92	32.34
1989	33.62	32.37	31.97
1990	30.93	31.26	31.52

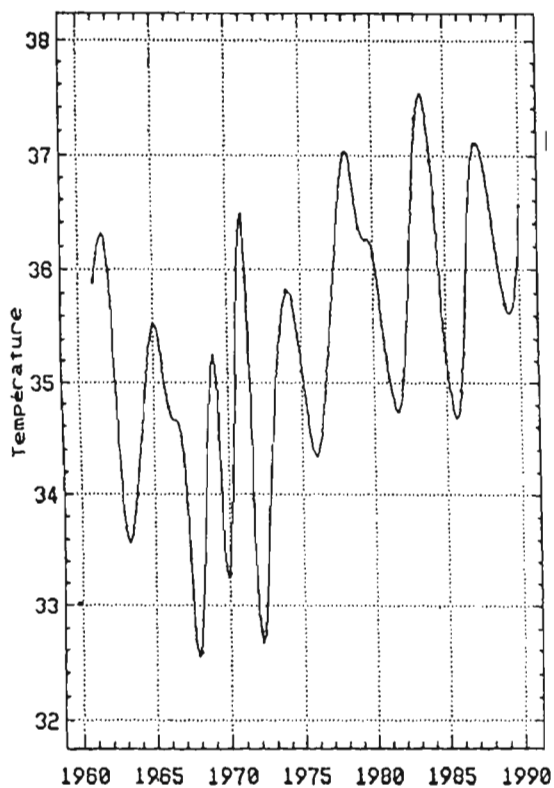
Figure n° 3
Température moyenne de mai à Bamako



a) Décade 1



b) Décade 2



c) Décade 3

Figure n° 4

Température moyenne de mai à Kidal

Tableau 3

Températures décadaires à Kidal

ANNEE	Décad1	Décad2	Décad3
1961	33.64	33.62	35.89
1962	31.29	34.45	35.99
1963	28.57	32.59	33.71
1964	34.37	33.35	34.30
1965	34.02	35.16	35.52
1966	32.89	32.75	34.77
1967	35.66	36.15	34.34
1968	34.10	33.49	32.57
1969	34.50	33.38	35.24
1970	33.87	36.39	33.30
1971	34.33	34.13	36.46
1972	32.43	32.54	32.76
1973	35.37	36.35	34.61
1974	33.23	35.42	35.82
1975	32.19	34.34	35.10
1976	32.56	34.36	34.35
1977	33.19	32.92	35.60
1978	35.10	34.67	37.02
1979	33.20	33.83	36.36
1980	35.18	36.47	36.11
1981	34.98	35.08	35.05
1982	32.97	34.93	35.02
1983	36.25	37.72	37.32
1984	34.33	36.31	36.95
1985	33.88	34.84	35.20
1986	33.14	33.74	34.93
1987	34.55	35.81	37.10
1988			
1989	32.61	33.97	35.71
1990	35.84	35.56	36.56

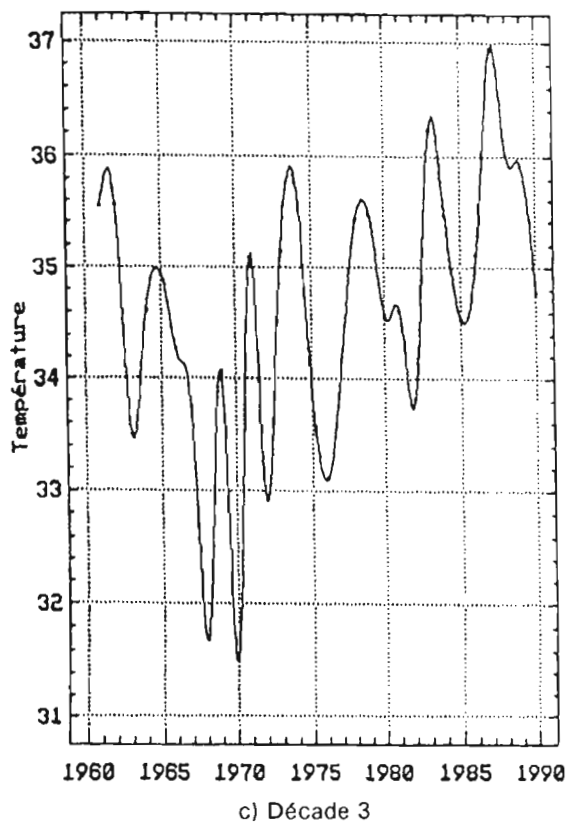
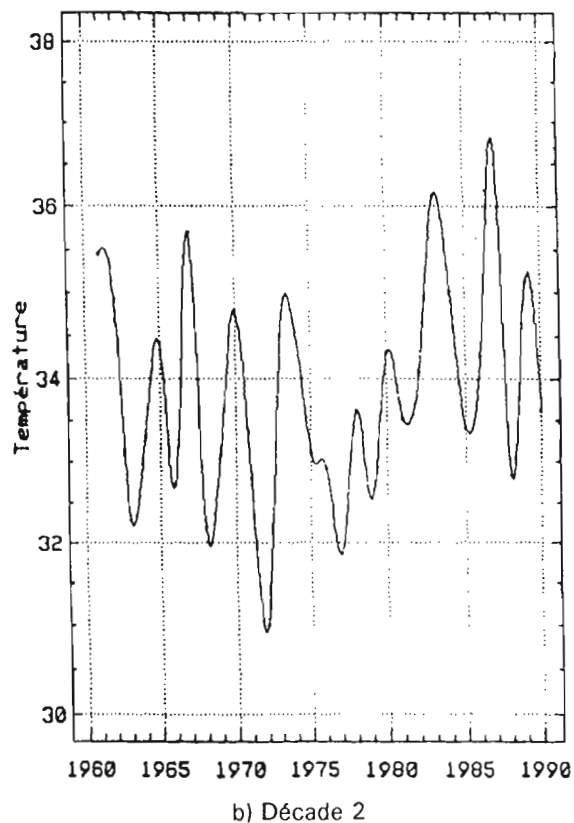
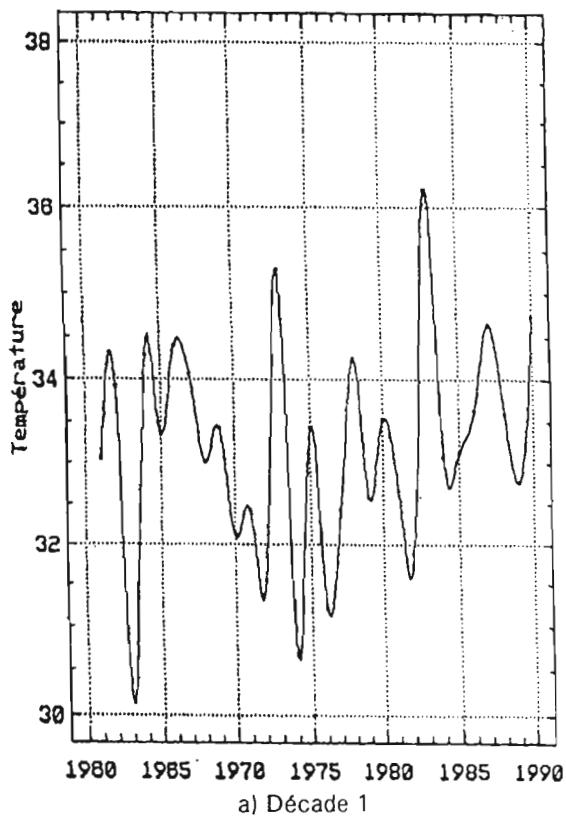


Figure n° 5
Température moyenne de mai à Tombouctou

Tableau 4
Températures décadaires à Tombouctou

ANNEE	Décad1	Décad2	Décad3
1961	33.06	35.45	35.55
1962	33.92	34.91	35.56
1963	30.14	32.30	33.50
1964	34.29	33.31	34.61
1965	33.37	34.43	34.95
1966	34.40	32.72	34.27
1967	34.07	35.71	33.73
1968	33.02	32.20	31.70
1969	33.43	33.12	34.06
1970	32.13	34.80	31.53
1971	32.44	32.81	35.08
1972	31.55	31.00	32.93
1973	35.29	34.52	35.15
1974	30.68	34.54	35.78
1975	33.43	33.11	33.82
1976	31.22	32.92	33.12
1977	32.43	31.87	34.20
1978	34.25	33.62	35.43
1979	32.57	32.56	35.45
1980	33.55	34.32	34.57
1981	32.67	33.51	34.61
1982	31.90	34.09	33.83
1983	36.20	36.12	36.24
1984	33.08	35.02	35.45
1985	33.13	33.40	34.54
1986	33.64	34.27	35.12
1987	34.65	36.77	36.95
1988	33.60	32.84	36.01
1989	32.78	35.12	35.92
1990	34.73	33.63	34.77

DONNÉES SUR LES TRANSPORTS DU NIGER MOYEN ENTRE KANDADJI ET NIAMEY

R. GALLAIRE

RÉSUMÉ

Initié en 1976 par un projet de barrage à proximité de la frontière malienne, le contrôle des transports du fleuve Niger s'est poursuivi, durant près de dix ans, sur le site projeté (Kandadji), puis à Niamey.

Le transport en suspension, faible toute l'année, connaît deux maxima :

- .Celui de l'hivernage, lié aux apports des affluents sahéliens, possède les concentrations les plus fortes ; mais s'appliquant à des débits encore modestes elles n'induisent pas de masses importantes.
- .Celui de la crue dite "malienne" survient, dans le cadre actuel de sécheresse, en Octobre-Novembre. Les concentrations sont plus modestes mais elles concernent des débits beaucoup plus importants, d'où des masses transportées nettement supérieures à celles de l'hivernage.

En décrue une légère reconcentration, de janvier à Mars, apparaît liée au rôle de l'Harmattan, qui renforce le pouvoir évaporant de l'air, remet en suspension, par agitation, des sédiments de fond et de berges, et apporte des aérosols.

En phase finale de l'étiage, la part du transport dissous qui, sur ces eaux faiblement concentrées n'est jamais négligeable, devient prépondérante.

Les courbes granulométriques montrent que le volume des "fines", inférieures à dix microns, est une constante tout au long du cycle hydrologique, et ne représente que de 10 à 15 pour cent du volume global de la suspension

INTRODUCTION

Contexte de l'étude:

Le projet de barrage sur le site de Kandadji motiva une étude dont le volet hydrologique fut confié à l'ORSTOM par la SOFRELEC en accord avec le Ministère des Mines et de l'Hydraulique du Niger. Cette étude, qui s'effectua sur cinq ans de 1976 à 1981, avait entre autre but d'évaluer, comme à l'occasion de tout projet de retenue, l'importance du transport solide en suspension responsable de la diminution du potentiel de l'ouvrage.

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

Situation et conditions naturelles:

A 30 km de la frontière malienne, Kandadji se situe sur la branche amont issue de la "cuvette lacustre" à environ 400 km en aval de cette dernière (Fig. 1 et 2) Depuis cette vaste zone amphibie, encore appelée "Delta intérieur", le fleuve Niger ne reçoit qu'un seul affluent digne de ce nom, le Gorouol, dont le bassin de 45000 km², en partie endoréique, chevauche trois pays : Mali, Burkina Faso et Niger, et qui conflue en rive droite à quelques kilomètres seulement à l'amont de Kandadji.

Les cinq premières années de contrôle des suspensions s'effectueront donc sur le Niger à Kandadji et le Gorouol à Dolbel.

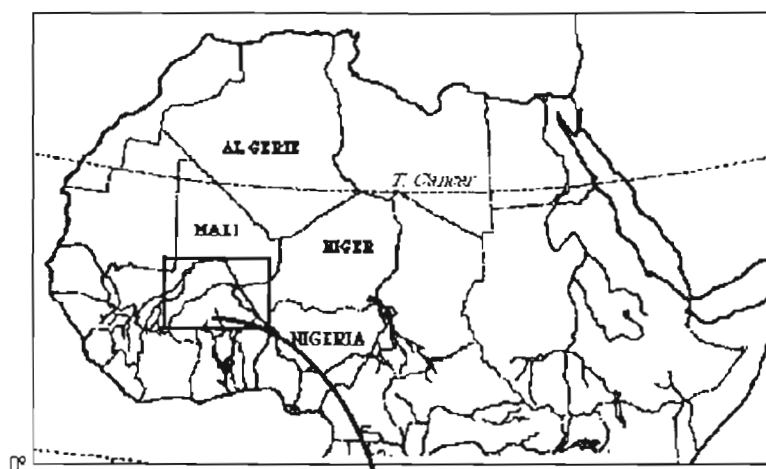


Figure 1 :
Localisation de l'étude.

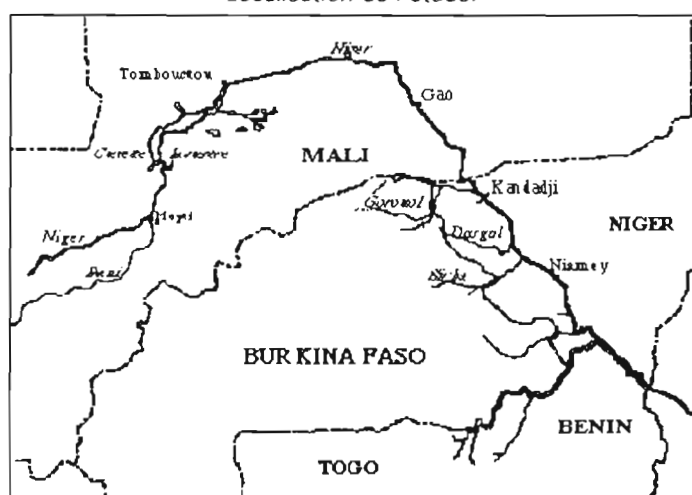


Figure 2 :
Domaine d'étude

Le site de Niamey, à 180 km en aval de Kandadji, intègre deux nouveaux affluents en rive droite, le Dargol et la Sirba dont les bassins, respectivement 7200 et 39000 km², sont installés sur les mêmes formations du Liptako voltaïque, où l'endoréisme est encore présent du fait de pentes faibles, mais où les dépôts éoliens sont moins importants.

La position plus méridionale assure d'autre part une meilleure pluviosité, et le régime sahélien des précipitations est progressivement teinté d'influence tropicale.

L'endoréisme moins marqué et les précipitations plus abondantes expliquent l'importance croissante des apports au fleuve Niger, comme le montre le tableau 1 qui présente les caractéristiques hydrologiques des affluents calculées sur la décennie 1976-1986.

Tableau 1 :
Caractéristiques des bassins affluents du Niger

Affluents du N au S	Superficie Bassin km ²	Pluviométrie annuelle mm	Module m3 s-1	Débit spécifique l s ⁻¹ km ²
GOROUOL	45000	250-300	9	0,2
DARGOL	7200	350-400	6,6	1,1
SIRBA	39000	>500	18	2,2

Le régime hydrologique du fleuve est fortement influencé par son passage dans le "Delta intérieur":

La crue est laminée : près de 50 % du débit entrant ne se retrouve pas à la sortie, essentiellement en raison de pertes par évaporation dans les champs d'inondation qui peuvent représenter plusieurs dizaines de milliers de km² en hautes eaux.

La crue est régularisée à sa sortie de la cuvette ; le Niger présente un hydrogramme de forme simple. Les différents régimes de la pré-cuvette se confondant, les débits évoluent donc de façon progressive, sauf en hivernage où les apports brutaux des affluents peuvent venir perturber la régularité de la montée de la crue.

Cette régularité facilitera grandement le contrôle des débits tant liquides que solides.

I. LES MESURES, PRINCIPE ET METHODES:

1) La pratique courante de la mesure des suspensions sur les grands fleuves s'est apparentée jusqu'ici à celle de la mesure des débits.

Elle utilise une technique lourde qui consiste à prélever dans la section mouillée autant d'échantillons d'eau qu'il est pratiqué de mesures de vitesses.

Ces échantillons (10 litres dans notre cas) sont décantés puis filtrés à 10 μ (la filtration à 10 μ répondait au souci de l'aménageur d'estimer la vitesse de colmatage de l'ouvrage projeté), et étuvés à 105 ° avant d'être pesés au centième de gramme. La masse obtenue, qui contient encore de la matière organique, est rapprochée du volume d'eau prélevé pour définir la concentration en mg l⁻¹.

A partir de ces valeurs ponctuelles de concentration diverses méthodes de traitement permettent d'obtenir le débit solide et la masse transportée.

2) Le calcul du débit solide :

Trois méthodes ont été testées durant les dix années d'étude :

a) La méthode la plus rigoureuse est celle utilisée à l'ORSTOM par J-F Nouvelot, dès les années soixante, qui consiste à affecter à chaque valeur de concentration la vitesse correspondante. Le produit concentration - vitesse est ensuite traité, suivant la technique de la double intégration graphique des débits liquides, pour arriver au débit solide.

$$Q_s = \int_0^p \int_0^l q_s \cdot dl \cdot dp$$

Avec: Q_s : Débit solide

q_s : Le débit solide par unité de section mouillée (g.m⁻².s⁻¹)

l : La largeur du cours d'eau

p : La profondeur du cours d'eau.

b) La méthode de pondération fait intervenir la notion de concentration moyenne dans la section,

$$Q_s = Q_l \cdot C$$

que l'on obtient aussi par une double intégration graphique, sur la largeur et la profondeur, des valeurs ponctuelles de concentration.

Cette méthode a pour inconvénient de considérer que la concentration est indépendante des autres facteurs de l'écoulement, en particulier de la vitesse, ce qui n'est jamais vraiment le cas, même sur des fleuves réguliers comme le Niger.

c) La méthode de la moyenne arithmétique considère que la concentration moyenne dans la section est la moyenne arithmétique de toutes les concentrations relevées.
Tous les points de prélèvement ont le même poids dans la section :

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \frac{1}{n}$$

Où C est la concentration moyenne,
C_i la concentration ponctuelle,
n le nombre de points de mesure.

$$\sum_{i=1}^n C_i$$

Le débit solide devient alors : $Q_s = \frac{i}{n} \cdot Q_l$

Cette méthode semble une approche encore plus simplifiée du phénomène.

3) Résultats obtenus et fréquence des prélèvements;

Les premières mesures, et ultérieurement celles réalisées dans le cadre de la formation, furent menées dans l'espoir de vérifier l'homogénéité du transport dans la section qu'il n'était pas incohérent d'espérer sur un fleuve comme le Niger, aux pentes faibles, à la section régulière et aux profondeurs limitées (Rayon hydraulique proche de la profondeur moyenne).

a) Les résultats obtenus lors de ces contrôles (tableaux ci-dessous) ont montré qu'outre l'excellente cohérence des résultats donnés par les méthodes Nouvelot et arithmétique, il existait une étroite corrélation entre ces derniers (en particulier ceux de la méthode Nouvelot) et les résultats des prélèvements ponctuels.

Contrôle du 8 janvier 1985

METHODE	NOUVELOT Qs1	PONDERATION Qs2	ARITHMETIQUE Qs3
Débit solide (Kg s ⁻¹)	40,72	36,30	40,03
Variation Relative (%)	(Qs3 - Qs1) / Qs3 ∅(3,1) = 1,69	(Qs1 - Qs2) / Qs1 ∅(1,2) = 10,85	(Qs3 - Qs2) / Qs3 ∅(3,2) = 9,32

L'échantillon témoin prélevé ponctuellement donnant les résultats suivants :

Concentration: 0,073 g l⁻¹, débit solide : 40,15 kg s⁻¹.

Contrôle du 7 Février 1985

METHODE	NOUVELOT Qs1	PONDERATION Qs2	ARITHMETIQUE Qs3
Débit solide (Kg s ⁻¹)	14,98	12,75	15,6
Variation Relative (%)	(Qs3 - Qs1) / Qs3 ∅(3,1) = 4	(Qs1 - Qs2) / Qs1 ∅(1,2) = 14,9	(Qs3 - Qs2) / Qs3 ∅(3,2) = 18

L'échantillon témoin donna les résultats suivants :

Concentration : 0,066 g l⁻¹, débit solide : 14,98 kg s⁻¹.

Sur l'ensemble des jaugeages complets réalisés tant à Kandadji qu'à Niamey l'écart entre le résultat des mesures complètes et ponctuelles a toujours été compris entre 0 et 3†%. Ces démonstrations de l'homogénéité du transport dans la section ont justifié l'utilisation du prélèvement ponctuel comme technique simple de contrôle de la suspension sur le Niger.

b) Périodicité des prélèvements:

Durant le temps de l'étude pour l'ouvrage, les prélèvements furent réalisés, sur le fleuve comme sur le Gorouol, tous les trois jours, le lecteur d'échelles ayant néanmoins pour consigne d'augmenter la fréquence de l'échantillonnage en cas de rapide variation limnimétrique (crue du Gorouol).

Par la suite à Niamey les prises n'eurent lieu que tous les cinq jours en crue, tous les dix jours en décrue, sans que la qualité du suivi n'en paraisse altérée.

Au total 1300 échantillons seront prélevés aux trois stations observées (Dolbel, Kandadji et Niamey) et une douzaine de mesures complètes réalisées.

II. LES CONCENTRATIONS:

1) Evolution des concentrations particulières à Kandadji;

Quelque soit l'hydraulicité de l'année considérée, les concentrations ponctuelles apparaissent faibles;

_ Maximales en début d'hivernage où elles correspondent aux eaux de lessivage des premières crues des affluents, elles ne dépassent que rarement 500 mg l^{-1} (on note 830 mg/l en Juillet 1979, et surtout $1,6 \text{ g l}^{-1}$ en Juin 1977).

Ces maxima qui surviennent sur le fleuve avant l'arrivée des hautes eaux en provenance de Guinée et du Mali sont à rapprocher des valeurs enregistrées sur le Gorouol à la même époque où les concentrations atteignent fréquemment plusieurs grammes par litre :

$3,7 \text{ g l}^{-1}$ le 14/6/76, $5,4 \text{ g l}^{-1}$ le 3/6/77, $5,9 \text{ g l}^{-1}$ le 8/6/78 et $4,6 \text{ g l}^{-1}$ le 22/6/82 et où la concentration moyenne de la saison des pluies atteint 750 mg l^{-1} (Tab.3).

Il est vraisemblable que les affluents intermédiaires Dargol et Sirba, issus des mêmes types de formations, dont les bassins sont mieux arrosés et moins marqués par l'endoréisme, produisent des concentrations au moins égales à ces dernières.

_ Minimales en décembre-janvier, en début de décrue, les valeurs ponctuelles descendent en dessous de 30 mg l^{-1} . La moyenne des concentrations de Décembre de la période 76-83 n'est que de 32 mg l^{-1} .

_ Entre Janvier et Mars, alors que le fleuve est dans sa phase la plus active de décrue, et que l'on est en mesure d'attendre une perte de compétence, les concentrations augmentent à nouveau. les valeurs mensuelles interannuelles, bien que pondérant les phénomènes, illustrent malgré tout ce qui précède (Tableau 2, fig. 3).

Si les valeurs absolues de cette nouvelle tendance restent modestement inférieures à 80 mg l^{-1} , elles n'en constituent pas moins une anomalie dont la cause semble pouvoir être liée à divers facteurs climatiques :

Tableau 2 :

Concentrations moyennes mensuelles du Niger à Kandadji (en g m^{-3})

Année	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avri	Mai
76/77		272	139	168	108	70	37	30	45	68	71	68
77/78	207	269	244	120	97	56	38	46	57	41	68	71
78/79	141	295	145	137	100	52	30	27	52	93	76	83
79/80	106	330	161	97	75	43	27	20	40	59	52	86
80/81	108	513	405	161	104	35	28	35	21	41	30	46
81/82	96	384	293	148	73	38	24	29	41	24	28	33
82/83	396	295	217	142	92	31	42	77	66	91	84	77
MOY.	151	337	229	139	93	46	32	38	46	60	58	66

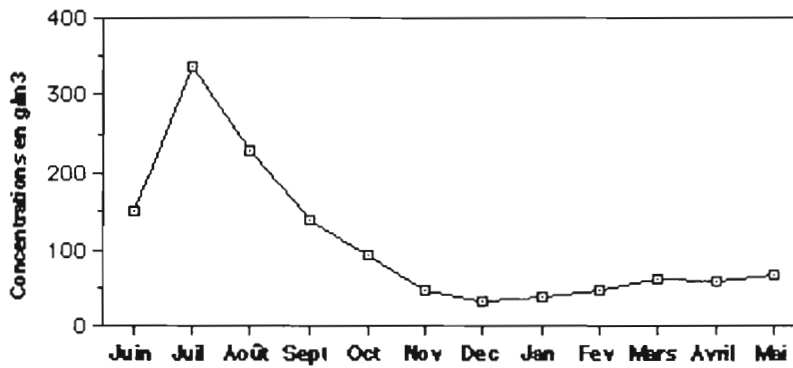


Figure n° 3

Concentrations moyennes mensuelles à Kandadji (1976 - 1983) en $g m^{-3}$

a) L'action de l'évaporation;

A partir de février on assiste à un relèvement des températures diurnes, comme le montre le graphique ci-après qui présente les températures maximales moyennes mensuelles de la période d'étude.

Mais c'est surtout l'action de l'Harmattan qui, durant cette période, explique le fort pouvoir évaporant de l'air.

Les valeurs relevées à la station météorologique de Kandadji doivent assez bien refléter les conditions existant sur la cuvette, bien que son étendue puisse générer un micro climat atténuant l'effet de continentalité et d'aridité .

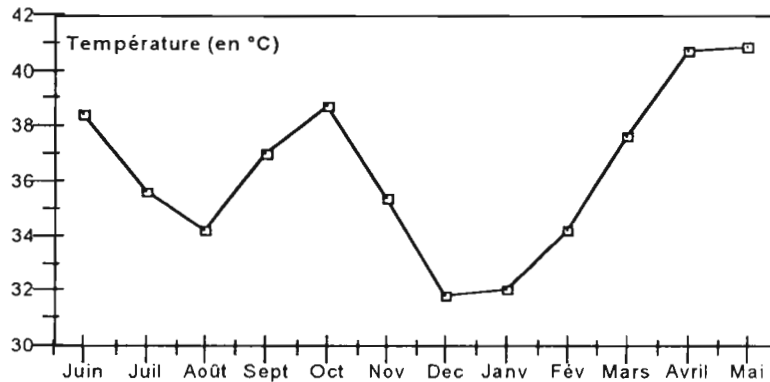


Figure n° 4

Moyenne mensuelle des températures maximales à Kandadji (1976 - 1983).

La figure 5 présente pour la période les variations mensuelles d'humidité relative calculées à 18 h à partir des températures sèches et humides, et d'évaporation Bac (Bac ORSTOM enterré de 1 m² et de 0,5 m³ de volume en eau).

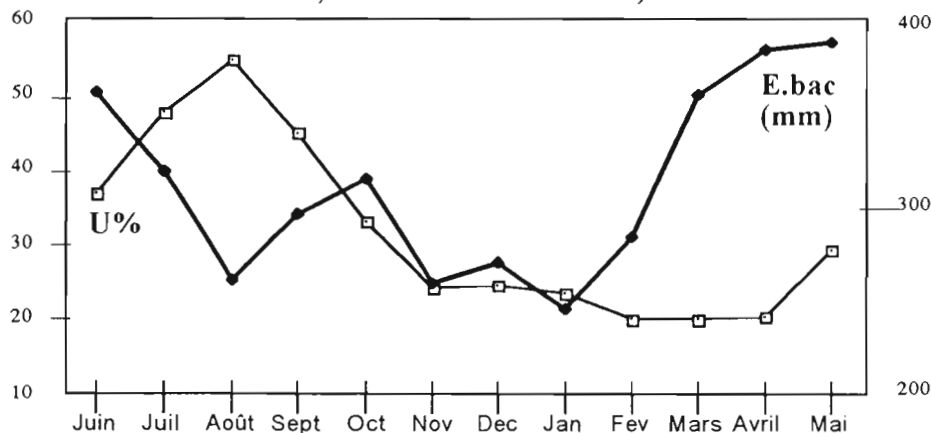


Figure 5

Moyenne mensuelle de l'humidité relative U et de l'évaporation bac à Kandadji (1976 - 1983).

b) L'apport des aérosols:

Durant cette même période de février à mars, l'harmattan, qui souffle du NE, apporte une grande quantité de poussières des déserts du Ténéré (Tafassasset et Tamesna), du Tanezrouft (célèbre pour son fech-fech) et du bassin des Iullemeden, sur le fleuve et surtout sur la cuvette lacustre.

Cet Harmattan "chargé de poussières désertiques" (M. Mainguet, G.Goude-Gaussen et P. Rognon) souffle à contre courant, soulevant des vagues dont la hauteur est surtout fonction de la distance d'action, 50 cm sur le fleuve, jusqu'à 1 m sur les hauts fonds de la cuvette lacustre (communication personnelle D. Chaizière) et dont l'agitation remet en suspension des éléments préalablement sédimentés sur le fond et les berges. Les embruns arrachés à la crête des vagues sont, avec ces dernières, autant d'écrans et de pièges pour les lithométéores des basses couches; en particulier lorsqu'ils sont hygroscopiques comme les argiles.

Ces particules dont la taille, pour pouvoir rester en suspension, est inférieure à 50μ (à Niamey 80 % des aérosols ont moins de 20μ et leur concentration est de l'ordre de 10 mg par m^3 d'air) peuvent donc contribuer de façon sensible à l'augmentation de concentration constatée dans les eaux du fleuve.

Durant les périodes d'Harmattan les vitesses de déplacement des masses d'air au sol sont de l'ordre de 15 à 20 nœuds (J.F. Griffiths). Sur la base d'une vitesse de 18 nœuds et d'un front d'eau sur le Delta Intérieur de 150 Km de large, l'apport journalier serait de $1,2 \cdot 10^{12}$ mg.

Si en janvier on considère que le débit moyen du fleuve, au cours de cette période de sécheresse, est de l'ordre de $1500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, l'apport des aérosols serait modestement de $9,26 \text{ mg l}^{-1}$.

Par contre en mars, le même apport éolien, sur seulement $425 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, serait de $32,7 \text{ mg l}^{-1}$, et expliquerait donc, en grande partie, à lui seul, la reconcentration.

La découverte de la finesse de ces éléments amena à s'interroger à nouveau sur la valeur de la filtration à 10μ opérée tout au long de l'étude.

Afin de répondre à cette interrogation, une série de prélèvements fut réalisée sur le fleuve entre Novembre 1992 et Avril 1993 (M. Estève, J.D. Taupin) ; la validité de cette expérience étant justifiée par la grande régularité de l'hydrogramme et la cohérence interannuelle des concentrations durant cette période (Tab. 2)

Ce dernier échantillonnage consista à effectuer une prise décadaire d'un litre dont l'unique traitement par étuvage préserva l'intégralité de l'information sur le transport, contrairement à l'opération mixte filtration-étuvage menée jusqu'ici.

Un double objectif était en fait fixé à cette expérience :

- La définition de l'erreur relative existant sur les résultats de la décennie étudiée,
- la recherche du rôle des aérosols dans la reconcentration des eaux de milieu de décrue.

La granulométrie fine au granulomètre laser dans la gamme $0-800 \mu$ permet de montrer (Fig.6) :

que la partie fine ($< 10 \mu$) de la suspension ne représentait en moyenne que 10 à 15 % du volume du transport.

que certains échantillons produisaient, à la fois, un second pic différentiel dans la gamme $200 - 400 \mu$ et une courbe cumulative redressée suggérant l'existence d'une fraction bien calibrée pouvant être d'origine éolienne.

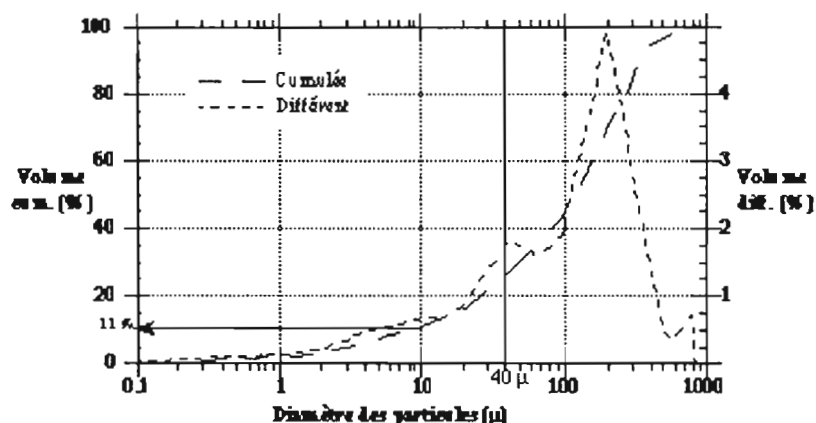


Figure n° 6
Granulométrie du 21/01/93

L'analyse au MEB-EDS d'une sélection d'échantillons montra que le matériau, très homogène, était essentiellement constitué de plaquettes d'argiles de 10 à 100 microns, sur lesquelles se trouvaient sertis, plus particulièrement en phase éolienne, de petits grains de quartz de 0,2 à 1 microns.

Les observations météorologiques à Niamey étant le plus souvent représentatives des types de temps régnant sur la "région du fleuve" (bonne corrélation avec les données de Tillabéry, à 110 km en amont) il est vraisemblable que cette représentativité puisse s'étendre à la *Cuvette*, tout au moins en ce qui concerne les périodes de vents de sable.

Suivant les vitesses de propagation du flux liquide (J.P. Lamagat, B. Billon), la correspondance des lignes 3 et 4 du tableau ci-dessous serait décalée de 5 à 8 semaines.

Date	23-11	2-12	11-12	21-12	1-01	11-01	21-01	1-02	26-02	8-03	22-03	3-04	14-04
Concentrat (mg/l)	65	80	75	(1320)	65	60	(726)		(233)	(177)	121	59	85
Chasse sable	non	oui	non	oui		oui	oui		non	oui	oui		oui
Granulo. 100-400 µ	non	non	non	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Silice RX				oui			oui				oui		

(entre parenthèses: Débits en $m^3.s^{-1}$)

2) Evolution des concentrations particulières à Niamey :

La comparaison des concentrations moyennes mensuelles calculées pour Kandadji (tab.2) et Niamey (tab.3), illustrée par la figure 7 ci-dessous, montre que les valeurs de la capitale (bien que leurs moyennes soient encore insuffisamment représentatives du fait de leur calcul sur deux ou trois ans) sont toujours globalement plus élevées que celles de Kandadji.

Tableau 3
Concentrations moyennes mensuelles (en $g.m^{-3}$) du Niger à Niamey

Année	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avri	Mai
1984									79	48	88	165
84/85	329	442	338	241	500	150	100	74	77	106	71	133
85/86	133	383	402	373	227	176	116	109	106	72	75	77
1986	91	440	504	454								
MOY.	184	422	415	356	364	163	108	91,5	87,3	75,3	78,0	125

Dans le détail, les disparités du tracé trouvent une explication principalement dans la présence des affluents intermédiaires, Dargol et surtout Sirba, dont les écoulements viennent rejoindre ceux du fleuve plus de six mois par an (Tab.4).

Tableau 4

Concentrations moyennes mensuelles du Gorouol à Dolbel (en g.m⁻³)

Année	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	MOY	Mod
1976				1270	709	659	453	1060	310*	830	6,6
1977				1470	735	458	380	242		657	9,6
1978	770*	700*	540*	1410	590	300	910	1220		886	11,5
1979			1120	1260	1310	660	350	290	380*	774	7,6
1980					723	509	318*			516	8,6
1981				960*	960	680	600	400*		720	6,8
1982			1371	1221	1052	578	316	411*		716	12,1
MOY.			1010*	1265*	868	549	475*	604*	345*	752 #	9

*: Ecoulements non permanents #: de juin à octobre Mod: Module en m³ s⁻¹

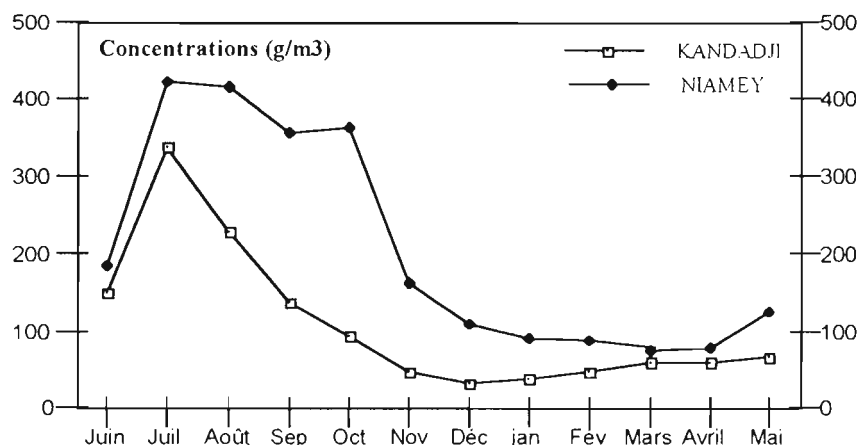


Figure n° 7 :

Concentrations moyennes mensuelles à Kandadji (76-83) et Niamey (84-86)

Alors qu'à Kandadji la courbe de décrue des concentrations est régulière, dès le mois d'août, à peine perturbée en octobre par le retour du FIT et l'approche des hautes eaux guinéennes, à Niamey le maximum (qui comme à Kandadji est dû à l'arrivée des eaux des affluents) s'étale sur deux mois en raison des apports relativement plus importants des émissaires intermédiaires Dargol et Sirba.

La décrue qui suit apparait nettement plus perturbée en octobre qu'à Kandadji pour les mêmes raisons, mais aussi parce que la valeur moyenne de Niamey, qui n'est établie pour cette période que sur deux ans, intègre l'averse exceptionnelle de 200 mm survenu dans la région de Tillabery le 30 septembre 1984 après un hivernage particulièrement déficitaire.

Cette averse provoqua localement d'importants ruissellements et une intense érosion, malgré l'activité végétative encore partiellement efficace à cette période de l'année. La figure 8 illustre cet évènement et souligne l'importance de la suspension qui dépasse un gramme par litre sur le fleuve, durant une dizaine de jours, et ce malgré des débits naturels sur le Niger de l'ordre de huit à neuf cents m³.s⁻¹.

Le schéma d'évolution de l'année 1985 est vraisemblablement représentatif d'une année moyenne dans le contexte de sécheresse actuel (Fig.9)

Les concentrations qui sont maximales fin Août ne dépassent guère 500 mg.l⁻¹ et correspondent aux apports des affluents consécutifs à la redescende du FIT sur le Sahel.

La forte diminution ou l'arrêt des écoulements qui suit en Septembre-octobre sur les émissaires voltaïques entraîne à la fois sur le fleuve une pose dans la montée des eaux et un effondrement des concentrations. L'arrivée des hautes eaux maliennes en Novembre ralentit seulement cette dernière tendance sans parvenir à l'inverser.

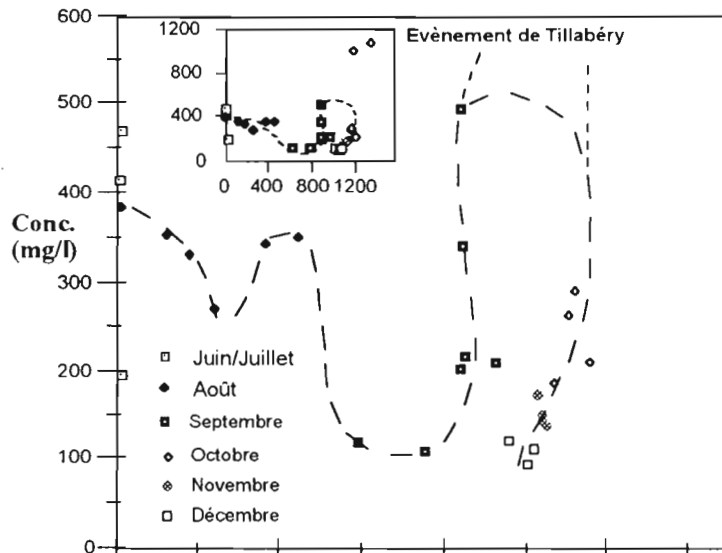


Figure n° 8

Relation concentration débit à Niamey en 1984

Il apparait donc qu'à Niamey les concentrations sensiblement plus élevées qu'à Kandadji, une bonne partie de l'année (excepté en fin de saison sèche et en début d'hivernage), soient le fait des affluents rive droite et en particulier de la Sirba qui possède, et de loin, de par la superficie de son bassin et sa position plus méridionale, les meilleures potentialités.

Lors de la première phase de décrue naturelle du fleuve de janvier à mars nous avons vu précédemment qu'à Kandadji la valeur des concentrations, en liaison avec l'action de l'harmattan, augmentait à nouveau durant cette période.

Cette observation n'est pas réalisée sur la figure 7 pour Niamey, bien que l'on puisse noter entre janvier et février un pallier dans la décroissance des valeurs. Il est probable que cette absence de similitude soit encore liée à la faible représentativité des moyennes de Niamey; mais au fait aussi qu'à partir de 1986 les lâchures des barrages maliens ont soutenu épisodiquement la décrue du fleuve modifiant donc le schéma naturel:

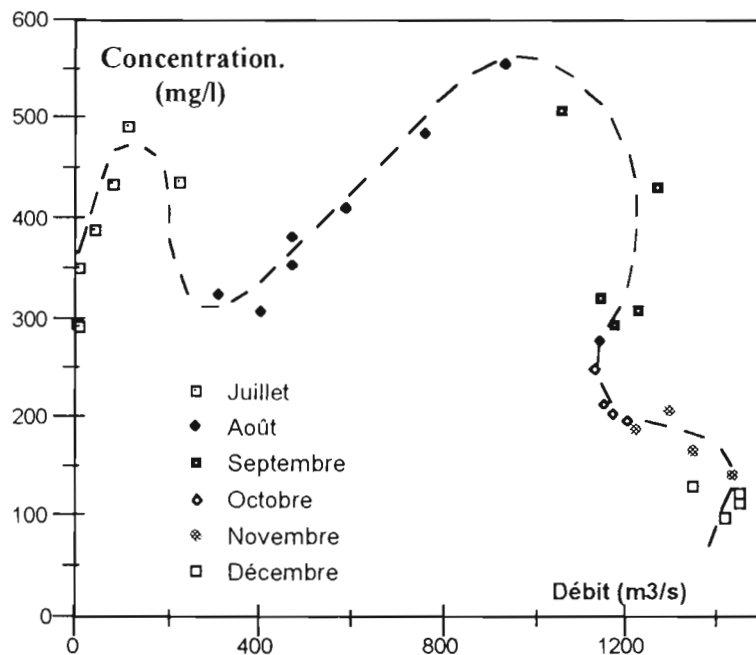


Figure n° 9

Relation concentration débits à Niamey en 1985

Le début de l'année 1985 présente encore à Niamey (tab.3) une augmentation des concentrations conforme au schéma de Kandadji ; en 1986 elles décroissent jusqu'en mars et augmentent à nouveau jusqu'à fin Mai sous l'effet des soutiens maliens, et avant l'arrivée des premières eaux voltaïques de Juin.

Les résultats des prélèvements effectués entre la pointe de crue 1992 et l'étiage 1993 montrent cependant que l'influence éolienne peut aussi apparaître à Niamey (Fig. 10).

Car si la forte augmentation des concentrations, conjuguée au ralentissement de la décroissance des débits fin mars, peut être partiellement imputée à une lâchure de la retenue prés-cuvette de Markala, il n'en est rien pour le phénomène de fin Janvier qui intervient au moment d'une accélération de la décrue naturelle du fleuve.

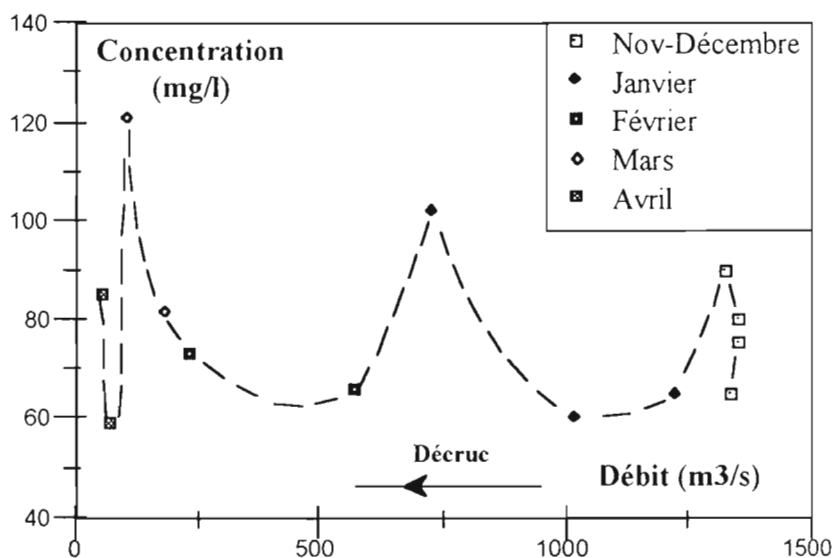


Figure n° 10
Relation concentration débit à Niamey en 1992/93

3) Concentrations de substances dissoutes:

On admet habituellement que dans le transport des régions sahéliennes la fraction dissoute est négligeable par rapport à la fraction particulaire. Dans la littérature un rapport moyen de 90 % en faveur de la suspension est généralement avancé.

Si cette considération ne peut être écartée lorsque les suspensions atteignent ou dépassent un gramme par litre, il n'en est plus de même lorsqu'elles apparaissent de l'ordre du dixième de gramme; et il devient alors nécessaire de s'interroger sur la participation de la fraction dissoute au transport global. D'autant plus qu'en milieu intertropical la variation saisonnière des facteurs influençant l'hydrolyse des minéraux, et en premier lieu la température, est relativement faible, assurant donc une certaine stabilité annuelle à ce type de transport. A l'inverse les phénomènes de suspension sont très dépendants, en milieu sahélien, des conditions de pluviosité que l'on sait particulièrement aléatoires.

Grâce aux mesures qui furent réalisées à Kandadji en 1980 dans le cadre des études pour le barrage il est possible d'estimer la participation de la fraction dissoute au transport, bien que ces mesures qui restent ponctuelles soient peu nombreuses et inégalement réparties sur l'année hydrologique.

Des analyses chimiques ont été réalisées sur les eaux du fleuve à l'aval de Niamey entre 1984 et 1986 par une équipe du département de chimie de l'Université. Ses résultats, par ailleurs fort intéressants, n'ont pas été retenus, car ils sont apparus trop

marqués par les phénomènes de pollution liés aux rejets de la ville; en particulier les résultats de chlorures et phosphates.

Le tableau 5 montre que le maximum de concentrations de matières dissoutes (73 mg.l^{-1}) se situe en fin de saison sèche au moment où les débits sont les plus faibles et les températures de l'eau les plus élevées. Le minimum (31 mg.l^{-1}) survient à l'inverse en octobre au moment de l'arrivée des hautes eaux maliennes (Fig. 11).

Tableau 5

Substances dissoutes (concentrations ponctuelles en mg.l^{-1}) et suspensions (concentrations moyennes mensuelles en mg.l^{-1}) du Niger à Kandadji en 1980-1981.

PRELÈVEMENT	7/1	11/2	5/3	25/4	20/6	1/10	3/12	MOY.
Dissoutes	39,9	43,4	40,3	52,1	73,3	30,8	34,3	44,9
Suspensions	109	125	95,0	12,0	2,51	300	130	111
Conc. Globale	149	168	135	64,1	75,8	331	164	155
Susp/Glob.	0,73	0,74	0,70	0,19	0,03	0,91	0,79	0,71

Les transports en suspension présentent donc une évolution inverse des transports dissous:

Le rapport apparait positif pour les suspensions qui représentent globalement 71 % du transport. Mais si cette valeur est représentative du phénomène en décrue de Janvier à Mars, elle ne l'est plus en fin de décrue où les transports en suspension représentent moins de 20 % du flux global. A l'inverse durant l'hivernage l'apport solide des affluents doit assurer à la suspension une prépondérance accrue, à l'image des 91 % d'Octobre.

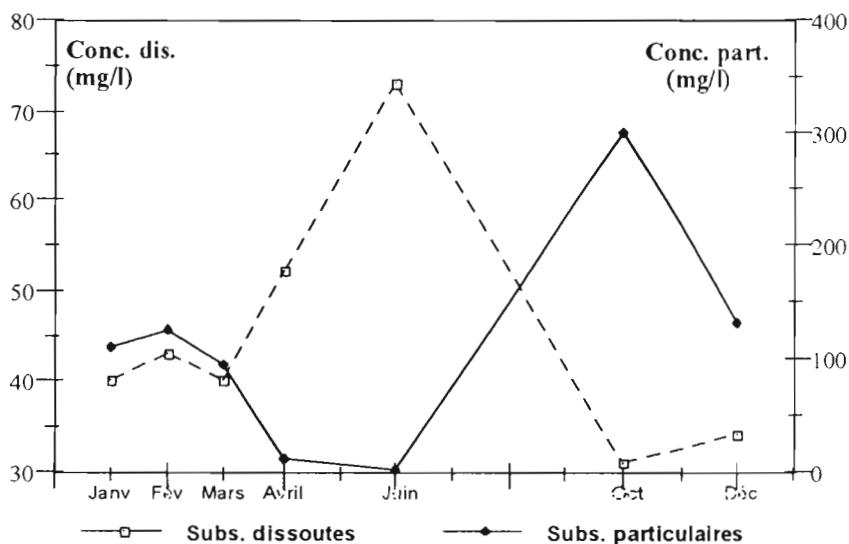


Figure n° 11

Concentration des matières dissoutes et particulaires du Niger à Kandadji en 1980-1981.

III. LES DEBITS SOLIDES ET LES MASSES TRANSPORTEES:

1) A Kandadji:

Le tableau 6 présente les valeurs mensuelles des masses ayant transitées à Kandadji durant les sept années d'étude du site.

La moyenne interannuelle est de 1635 tonnes; les années 1978 à 1982 présentent un faible écart à la moyenne, celui des années 1976 et 1977 étant d'environ 25 %.

L'étude de l'hydraulicité de ces deux années permet de voir qu'elles constituent les deux extrêmes de cette courte série :

- L'année 1976, avec un débit de pointe de $1\,935\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ et un module de $926\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, apparait statistiquement moyenne, relativement aux 52 valeurs de module possédées, mais plutôt excédentaire dans le contexte de sécheresse amorcé depuis la fin des années soixante.
- L'année 1977 avec un débit de pointe de $1405\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ et un module de seulement $565\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ apparait statistiquement déficitaire d'environ une année sur vingt par rapport à la normale, mais nettement moins par rapport aux dix dernières années.

Tableau 6
Transports solides en suspension (en milliers de tonnes) du Niger à Kandadji

Année	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	AN.
76-77	10,4	14,9	129	402	370	280	177	161	194	207	66,1	16,9	2028
77-78	20,4	47,4	136	225	273	195	152	131	65,1	19,1	10,8	4,82	1280
78-79	2,88	54,1	268	345	335	210	140	122	146	114	28,5	9,62	1775
79-80	3,84	16,6	231	280	276	191	133	109	125	76,1	15,9	6,29	1464
80-81	2,51	234	220	360	340	136	118	130	33,9	26,8	6,45	2,14	1610
81-82	1,79	30,3	262	433	276	161	115	125	80,3	17,3	5,05	2,44	1509
82-83	47,2	100	367	357	305	118	167	202	68,7	35,4	10,4	2,97	1781
MOY	12,7	71,0	230	343	311	184	143	140	102	70,8	20,5	6,45	1635

Ces deux années d'hydraulicités opposées soulignent donc que la masse transportée dépend avant tout du volume écoulé. Le rôle du Gorouol apparait ainsi minimisé dans ce domaine au profit du rôle de la crue guinéo-malienne.

La figure 12 ci-après qui superpose hydrogramme et flux moyens mensuels à Kandadji montre :

- que le flux de matière précède suivant le schéma habituel le flux liquide,
- que la participation des écoulements du Gorouol au flux de matière ne peut être que limitée, compte tenu de l'importance à partir d'Août des débits du fleuve qui atteignent $500\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, un facteur 20 à 50 existant alors entre les écoulements de cet affluent et ceux du Niger, sans que le rapport des concentrations, pourtant très favorable au Gorouol (facteur 10 à 15), n'atteigne ces valeurs. A Kandadji le flux de matières en suspension d'Août doit donc déjà dépendre majoritairement des écoulements guinéo-maliens; à plus forte raison ceux de Septembre.

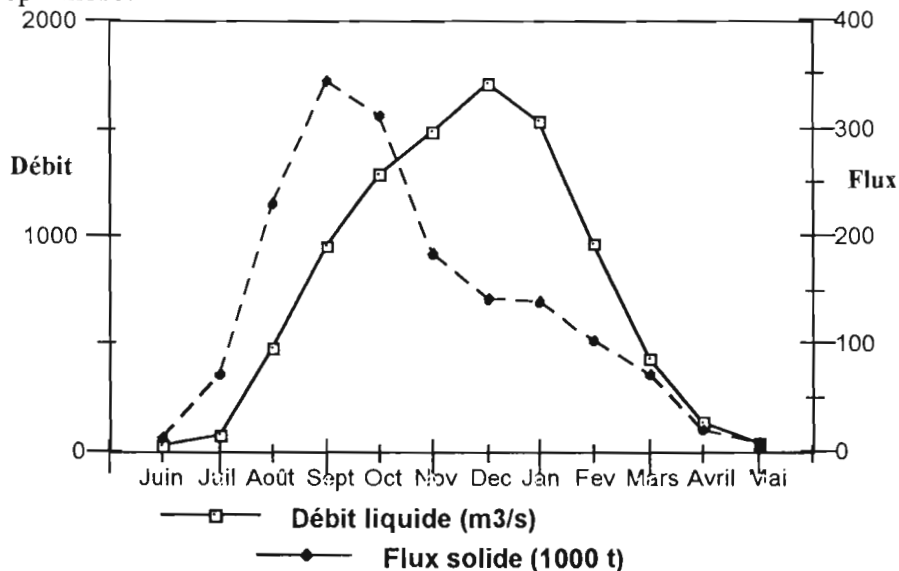


Figure n° 12
Hydrogramme et flux moyen du Niger à Kandadji.

2) A Niamey:

Le tableau 7 illustré par la figure 13 montre l'écart qui peut exister à Niamey entre une année reconnue faible, 1984, particulièrement si l'on fait abstraction de l'évènement exceptionnel du 30 Septembre dans la région de Tillabéry (sur la figure cette abstaction est figurée en pointillé) et une année 1985 qui peut être considérée comme moyenne dans le contexte de sécheresse des vingt dernières années.

Octobre représentant au Sahel la fin de l'hivernage, et donc une forte réduction des apports burkinabés; les transports de ce mois ne devraient pas ou peu, et malgré le passage des hautes eaux maliennes, excéder ceux de Septembre en année normale.

Tableau 7

Transports solides en suspension (en milliers de tonnes) du Niger à Niamey.

Année	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Ann.
1984									55,8	12,9	6,14	4,68	
84-85	13,9	11,5	259	519	1551	403	249	95,5	33,7	19,4	3,13	2,65	3161
85-86	0,98	70,7	552	1122	703	599	439	301	97,4	23,1	7,27	3,77	3919
1986	2,17	98,1	522	836									
MOY.	5,69	60,1	444	826	1127	501	344	198	62,3	18,5	5,51	3,70	3540

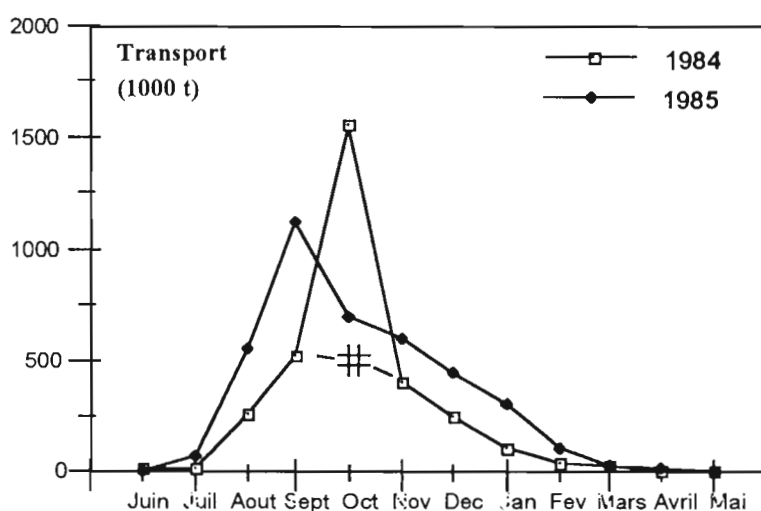


Figure n° 13

Transport particulaire à Niamey en 1984 et 1985.

Donc si l'on admet que l'évènement de Tillabéry a occasionné en 1984 une surmasse en Octobre d'environ un million de tonnes, et que l'on soustrait cette surmasse du total annuel, on constate que le transport de 1984 (2,15 millions de tonnes) n'aurait représenté qu'à peine plus de la moitié de celui de 1985 (3,9 millions de tonnes).

La moyenne des deux années hydrologiques est de 3,5 millions de tonnes, soit un peu plus de deux fois celui de Kandadji. L'apport pondéral saisonnier du Dargol et de la Sirba serait donc, contrairement à celui du Gorouol, très important, puisqu'il viendrait doubler le transport annuel du fleuve.

La période d'étude est encore trop limitée à Niamey, mais le fait que sur à peine trois années de suivi, dont seulement deux années hydrologiques complètes, on ait pu obtenir un tel différentiel sur les transports est assez significatif de leur variabilité d'une année sur l'autre. Variabilité qui apparait plus importante qu'à Kandadji en raison d'influences sahéliennes supplémentaires.

La différence du transport entre les deux stations n'est cependant pas un phénomène homogène comme le montre la figure 14 qui compare les transports moyens mensuels aux deux stations du fleuve et à celle de Dolbel sur le Gorouol (Tab.8).

Tableau 8

Transports solides en suspension (en milliers de tonnes) du Gorouol à Dolbel.

ANNEE	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL	AOÛT	SEPT	OCT	NOV	Année
1976				6,45	19,0	5,14	19,6	53,9	0,856*	104
1977				12,0	102	36,4	40,6	0,299		191
1978	0,06*	0,414*	2,19*	15,6	59,7	72,2	17,5	1,17*		165
1979			0,523*	10,4	25,7	46,7	41,2	2,59	0,404*	127
1980				0,073	131	63	1,39*			194
1981				3,76*	67,9	73,6	7,12	0,432*		149
1982			0,064*	16,2	51,0	139	16,3	0,080*		223
MOY.				10,1	65,2	62,3	23,7	18,9		180

*: Valeurs approchées, car écoulements non permanents

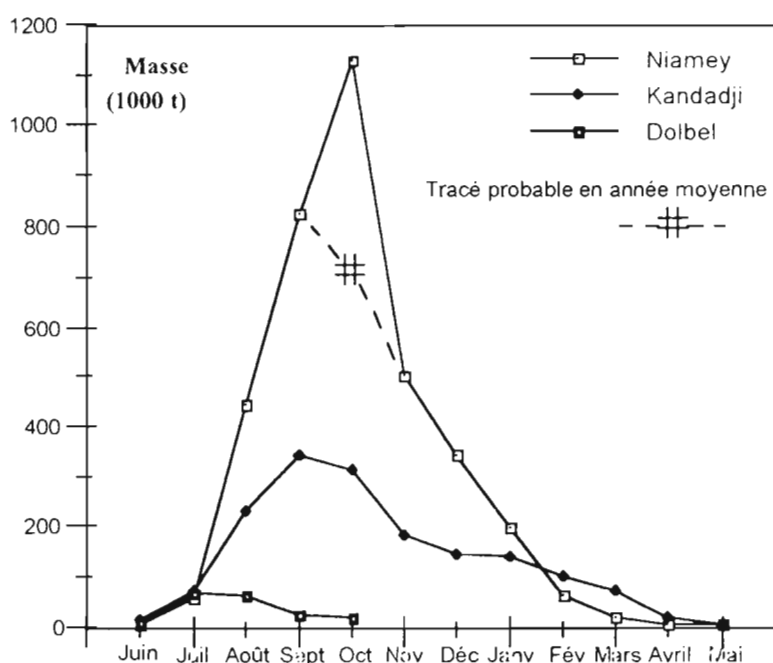


Figure n° 14

Transports solides moyens mensuels à Dolbel, Kandadji et Niamey.

Deux périodes distinctes apparaissent sur cette figure:

- La période d'influence des affluents sahétiens durant l'hivernage où le transport apparait nettement plus élevé à Niamey qu'à Kandadji.
- La période sans influence des affluents de Janvier à Juin où les masses transportées sont légèrement supérieures à Kandadji.

Bien que cette inversion de tendance ait peu d'impact sur le différentiel annuel entre les deux stations, elle montre, qu'en absence d'alimentation intermédiaire, le fleuve, qui à cette période est en pleine décrue naturelle, perd de sa compétence et dépose une partie de sa matière en suspension dans ce bief de 180 km.

Ce graphique illustre aussi le doublement annuel du transport entre Kandadji et Niamey; la surface du turbidigramme apparaissant à Niamey le double de ce qu'elle est à Kandadji.

Les apports du Gorouol à Dolbel ne semblent pas devoir excéder 10 % du transport de Kandadji, bien qu'en début d'hivernage ils en représentent la quasi totalité.

CONCLUSION

Le trouble est important toute l'année sur le fleuve au Niger, et ce malgré des concentrations qui restent relativement modestes. A Kandadji elles apparaissent déjà nettement supérieures à celles de la sortie de la cuvette en raison des apports du gorouol.

L'importante variation de concentration qui intervient entre les deux stations de Kandadji et Niamey est à mettre sur le compte des affluents intermédiaires de régime typiquement sahélien, Dargol et surtout Sirba, dont l'influence peut aussi être estimée à partir des mesures effectuées sur le Gorouol pour lequel la concentration moyenne atteint 750 mg.l^{-1} .

Ces résultats (ceux du fleuve, aussi bien que de ses affluents) sont assez comparables à ceux obtenus dans la cuvette tchadienne pour le Chari et le Logone; ce dernier ayant des origines latitudinales basses qui ne sont pas sans rappeler celles du Niger à l'amont pour ce qui est du régime d'alimentation.

Le bahr Sara à Manda, comme le Chari à Sarh, présentent des concentrations moyennes interannuelles de l'ordre de 50 mg.l^{-1} . On retrouve ce type de concentration sur le Niger supérieur à Siguiri (46 mg.l^{-1} en 87), la moyenne à cette station se situant même en dessous (33 mg.l^{-1}).

Si à Kandadji on ne considère que les mois non influencés par le Gorouol; c'est à dire de Novembre à Mai; la concentration moyenne tombe de 108 mg.l^{-1} à 50 mg.l^{-1} . Sans doute la crue guinéenne vient-elle soutenir les concentrations en fin d'hivernage (Tab 2); mais son action doit rester globalement limitée ne serait-ce qu'en raison du rôle régulateur que la "Cuvette Lacustre" doit imposer à la partie du transport supérieure à 40 microns. Il est donc vraisemblable qu'à son entrée au Niger le fleuve ne présente qu'une concentration moyenne de l'ordre de 50 à 60 mg.l^{-1} . Le Gorouol étant probablement responsable, à lui seul, d'une bonne partie des 50 mg.l^{-1} supplémentaires constatés à Kandadji.

En aval l'arrivée du Dargol et de la Sirba va à nouveau assurer un doublement des concentrations qui dépassent 200 mg.l^{-1} à Niamey.

On retrouve sur le Logone à Kousséri (aval des dernières confluences sahéliennes) des concentrations moyennes comparables: 174 mg.l^{-1} en 1972 qui fut considérée comme une année sèche.

La fraction particulaire du transport présente un schéma d'évolution inverse de la fraction dissoute qui montre que le Niger moyen, outre l'effet tampon de la "Cuvette Lacustre", est sous l'influence de deux domaines climatiques:

Durant tout l'hivernage et jusqu'en Septembre/Octobre il se trouve sous une influence typiquement sahélienne, les apports particuliers apparaissant largement supérieurs aux apports dissous (vraisemblablement plus de 80 % du transport total).

Progressivement, avec la pointe de crue et la décrue qui suit, le rapport diminue tout en restant favorable à la suspension, qui représente encore 70 % du transport en Mars. Ce maintien de l'influence sahélienne aussi longtemps après la disparition des écoulements sur les affluents (la Sirba peut apporter au fleuve une contribution significative jusqu'en Décembre ou Janvier) ne peut s'expliquer que par l'effet tampon de la Cuvette Lacustre qui transmet avec plus de deux mois de retard les dernières manifestations sahéliennes de l'avant-cuvette; et par la réalimentation de la suspension sous l'effet des aérosols.

La disparition de ces derniers en Avril-Mai et la perte de compétence du fleuve lors de la phase de tarissement assurent au domaine guinéen, d'Avril à Juin, une très nette supériorité; les substances dissoutes assurent alors plus de 80 % du transport global.

Des analyses chimiques des eaux du fleuve ont été réalisées à l'aval de Niamey entre 1984 et 1986 par une équipe du département de chimie de l'Université. Ses résultats, par ailleurs fort intéressants, n'ont pas été retenus, car ils sont apparus trop marqués par les phénomènes de pollution liés aux rejets de la ville, et venaient donc, sur des concentrations faibles, influencer les valeurs naturelles (en particulier chlorures et phosphates).

BIBLIOGRAPHIE

- BEN MOHAMED A., FRANGI J.P., FONTAN J., DRUILHET A., FOULANI P., 1991** - Analyses multiélémentaires semi-quantitatives par fluorescence X des aérosols, sols et principaux aliments du Niger. Annales de l'Université de Niamey - Tome IV pp 37-52.
- BERTRAND J., 1976** - Visibilité et brume sèche en Afrique. La Météorologie, VI^e série, n° 6, pp. 201-211.
- BILLON B., 1968** - Mise au point des mesures de débits solides en suspension (République du Tchad). Cahiers ORSTOM, série hydrologie, vol.V n° 2, pp 3-14.
- BILLON B., 1984** - Etude des basses eaux du Niger à Niamey. ORSTOM-DRE, Niamey, Décembre 1984, 3 p, 5 f.
- BILLON B., 1985** - Le niger à Niamey, décrue et étiage. Cahiers ORSTOM, série hydrologie, vol.XXI, n° 4, 1984-1985.
- BOUVIER J.C., BILLON B., 1984** - Enquête sur les crues des Koris traversant la route Tillabéry-Ayorou à la suite de la pluie du 30 Septembre 1984. ORSTOM-DRE, Niamey, 10 p, 6 fig.
- BRUNET-MORET Y., CHAPERON P., LAMAGAT J.P., MOLINIER M., 1986** - Monographie hydrologique du fleuve Niger. Editions de l'ORSTOM, Paris.
- CAMAIL M., MAHAMANE M., PUCCI B., RIGAUD J.P., 1987** - Analyses chimiques des eaux du fleuve Niger à Niamey. Hydrologie Continentale, vol.2, 1987: 87-99.
- CHOURET A., 1975** - Etude des transports solides en suspension au Tchad. campagnes 72-73, 73-74, 74-75. Bilan de sept années d'observations (1968-1974) ORSTOM N'Djamena.
- COUDE-GAUSSEN G., ROGNON P., 1983** - Les poussières sahariennes. La Recherche, vol. 14, n° 147, pp.1050-1061.
- GALLAIRE R., 1984** - Le Niger à Kandadji, synthèse des études. ORSTOM-TP-SOFRELEC, ORSTOM Niamey.
- LAMAGAT J.P., 1984** - Modèle provisoire de propagation des crues du Niger de Koulikoro à Niamey; ORSTOM-CEE-ABN. Paris, Mars 1984.
- MAINGUET M., 1977** - Analyse quantitative de l'extrémité sahélienne du courant éolien transporteur de sable au Sahara nigérien. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 285, sér. D, n° 10, pp.1029-1032.

MOUKOLO N., BRICQUET J.P., BIYEDI J., 1990 - Bilans et variations des exportations de matières sur le Congo à Brazaville de Janvier 87 à Décembre 88. Hydrologie Continentale , vol.5, n° 1, 1990: 41-52.

ORANGE D., 1990 - Hydroclimatologie du Fouta-djalon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique. Thèse de l'Université Louis Pasteur, Stasbourg.

LISTE DES ANNEXES

Les débits moyens mensuels du Niger à Koulikoro de 1903 à 1993.

Les débits journaliers du Niger à Banankoro de 1990 à 1993.

Les débits journaliers du Niger à Koulikoro de 1990 à 1993.

Les débits journaliers du Niger à Ké - Maciana de 1990 à 1993.

Les débits journaliers du Bani à Douna de 1990 à 1993.

Les débits journaliers du Niger à Akka de 1990 à 1993.

Les débits journaliers du Niger à Diré de 1990 à 1993.

Note préliminaire sur la crue du Niger en 1994.

ANNEXES

Le Niger à Koulikoro

Débits moyens mensuels en m³ s⁻¹

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
1907	327	144	76.9	46.8	53.8	266	828	1900	3750	3080	1990	925
1908	338	153	70.9	38.6	35.8	196	664	2300	4110	4050	1680	794
1909	302	156	87.8	60.0	178	900	1930	4880	6280	4530	2690	1140
1910	504	183	83.0	53.9	49.2	185	851	3030	4510	3680	1440	565
1911	237	85.9	49.9	34.3	53.9	294	1210	4080	6250	4100	1760	783
1912	351	156	80.9	40.9	29.6	82.6	944	2300	4550	4660	1690	672
1913	354	147	51.2	26.3	30.0	126	654	1300	3080	2310	1400	505
1914	194	59.7	44.4	47.1	85.1	275	596	1230	3640	3160	1180	580
1915	190	65.9	32.8	30.3	102	609	1610	2880	4830	3740	1500	651
1916	332	158	66.5	40.0	47.2	140	1440	3350	5070	4140	1260	474
1917	225	112	72.7	23.6	45.0	238	784	3590	5910	3740	1520	966
1918	453	222	115	118	166	909	1700	3980	4590	4140	1850	860
1919	385	184	115	49.3	59.2	592	1620	3230	4710	3760	1450	631
1920	280	118	64.0	48.8	69.7	376	1530	2630	4390	3150	1480	623
1921	253	112	71.7	45.2	44.8	103	708	2380	4010	2840	1250	579
1922	212	100	48.0	33.8	91.2	210	615	2280	4490	5680	2400	1130
1923	459	179	84.6	132	93.2	317	1390	3000	5000	4230	2440	1020
1924	461	246	110	45.6	38.5	228	1880	5060	7300	7010	2600	1080
1925	537	260	127	69.2	84.9	466	1610	4090	6800	8450	3890	1380
1926	669	346	145	75.3	61.0	558	2190	3770	5910	4020	1810	945
1927	445	186	80.0	44.7	91.2	283	1580	3200	5620	6220	4070	1350
1928	610	274	114	61.0	125	398	1300	5060	7630	6010	2930	1140
1929	601	254	156	101	114	787	2340	4220	6230	6340	2530	1030
1930	515	281	146	81.4	85.5	933	1820	4630	6110	5860	2640	1020
1931	549	259	121	110	316	948	1720	3930	5560	4700	1700	893
1932	543	260	130	112	159	560	1780	3220	6560	4740	2180	982
1933	474	218	135	84.0	89.5	498	2020	3930	6180	3490	1500	898
1934	420	193	96.8	62.2	53.7	139	965	3600	5020	4140	2060	810
1935	368	187	76.7	56.8	41.8	97.9	1140	3990	5180	4120	1500	629
1936	270	123	76.1	46.0	365	714	1400	2990	5480	5770	2100	1020
1937	431	198	108	89.6	94.3	207	877	2300	4750	3990	1840	675
1938	294	126	82.7	59.6	56.4	184	771	3090	5280	4760	2160	741
1939	316	135	67.8	42.2	73.1	262	688	2260	4560	4870	2030	861
1940	376	157	83.0	47.7	49.0	181	928	2650	3470	3600	1870	675
1941	301	139	60.6	34.4	43.2	219	966	2410	5340	3070	1510	728
1942	328	148	65.8	48.2	118	293	769	2240	4060	2160	1230	614
1943	235	104	50.4	46.3	72.8	164	687	2150	4720	3950	1500	553
1944	247	102	46.3	30.8	51.8	108	482	1850	4410	2810	1350	542
1945	200	90.7	42.0	23.1	35.9	115	442	2750	4540	4220	1640	609
1946	219	99.0	43.3	43.8	77.9	290	977	2990	4790	5230	2450	878
1947	376	153	63.9	26.6	32.4	167	923	2580	4960	4310	1250	493
1948	182	83.8	50.2	34.1	53.9	331	1660	3840	6090	4490	2090	779
1949	370	191	104	94.3	81.0	118	630	3310	6270	3450	1450	674

Le Niger à Koulikoro

Débits moyens mensuels en m³ s⁻¹

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
1950	290	143	74.7	46.1	67.0	126	747	2510	5160	5520	2380	790
1951	379	204	133	84.7	211	558	1590	3710	5320	5380	5410	1820
1952	773	426	209	113	96.3	186	1220	3190	5100	5490	2310	929
1953	521	240	141	81.0	93.6	573	2180	4390	6570	5120	2370	1090
1954	625	328	190	182	206	661	1950	4230	6130	5110	3240	1690
1955	783	440	288	203	218	690	2040	4030	6050	5930	2740	1260
1956	680	381	236	167	120	194	1000	2260	4770	4520	1740	792
1957	401	186	103	58.3	72.1	328	1350	3810	6410	6860	3550	1270
1958	646	382	162	137	270	844	1500	2210	4480	4390	2240	1410
1959	628	336	170	83.8	99.0	324	1420	3010	5720	4470	1870	789
1960	375	181	88.1	62.3	85.1	305	1440	3780	5950	4900	2240	874
1961	379	173	82.0	38.7	74.0	97.4	983	2990	5410	3340	1320	505
1962	210	94.1	45.4	35.3	112	212	1130	3330	7110	6060	2820	1210
1963	511	272	174	70.8	130	137	671	2480	4850	5950	2810	897
1964	373	168	75.5	46.4	46.2	421	1230	3730	5440	5120	1840	969
1965	524	253	139	95.0	87.4	342	1840	2760	4800	4590	1940	708
1966	298	170	100	82.0	76.6	193	614	2810	4630	5070	2460	897
1967	400	189	110	58.8	105	142	956	3350	6020	8030	3050	1100
1968	544	290	163	105	116	742	1170	3350	4490	3890	1830	924
1969	429	195	114	85.3	62.4	302	1860	3750	6960	5780	4390	1280
1970	606	279	139	95.9	81.9	181	537	2490	5260	2950	1210	635
1971	242	110	60.0	38.6	54.6	109	743	3460	5500	3620	1160	669
1972	266	117	54.8	43.8	170	679	1330	2440	3700	2760	1390	650
1973	270	115	45.6	20.0	18.5	146	365	2760	3660	2240	1250	421
1974	181	72.5	34.0	27.5	26.9	72.1	1020	3360	5640	4640	1560	551
1975	224	99.4	42.1	35.2	93.8	231	1190	3220	5620	5270	1800	735
1976	334	139	54.4	30.7	64.8	272	813	2550	3430	4680	3970	1270
1977	600	273	109	43.9	39.5	171	609	1580	3310	2650	1050	391
1978	161	79.3	41.4	46.7	113	447	1160	2530	4250	4260	1900	727
1979	350	159	61.4	41.3	60.8	364	1540	4300	5230	3460	1700	706
1980	317	155	62.6	23.6	25.6	119	351	1810	3860	2060	1270	608
1981	223	85.4	31.4	21.1	133	252	942	2960	4390	2910	1110	419
1982	169	94.3	80.0	82.9	148	466	889	1920	3470	2050	1120	376
1983	162	98.2	80.5	72.4	93.2	315	940	1870	2950	2250	788	366
1984	189	118	114	118	160	287	629	1680	1630	1790	669	305
1985	156	106	106	112	123	169	504	2020	3950	2710	778	306
1986	144	116	111	126	148	198	409	1210	3100	2230	920	336
1987	179	142	138	152	197	275	461	1490	2110	2370	992	365
1988	180	136	100	93.0	117	146	556	1650	3080	1650	664	258
1989	139	115	94.2	134	178	131	324	1130	2170	2000	754	358
1990	147	89.0	82.2	112	142	269	655	1510	2440	1990	828	372
1991	185	126	125	108	113	218	643	1470	2510	2250	1020	384
1992	187	137	131	139	141	266	755	1430	2850	2000	869	383
1993	188	118	125	142	173	246	522	1550	2160	1980	1060	478

Station de Banankoro

Débits moyens journaliers en $m^3 s^{-1}$

Année 1990

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	
1	111	40.8	12.4	5.11	3.60	41.9	118	789	1990	1970	916	305	1
2	109	39.7	11.8	5.05	3.60	44.9	112	828	2030	1940	882	294	2
3	105	37.9	11.2	4.90	3.63	47.4	113	876	2070	1900	831	283	3
4	102	36.0	10.6	4.84	3.81	51.8	118	929	2080	1920	798	273	4
5	98.9	34.9	10.1	4.69	4.07	53.3	143	906	2100	1910	769	267	5
6	95.7	33.8	10.0	4.63	4.80	52.9	179	912	2110	1860	742	270	6
7	92.4	32.0	9.84	4.47	6.36	49.3	195	851	2090	1780	724	270	7
8	89.5	30.4	9.58	4.47	7.59	48.5	187	825	2100	1720	700	270	8
9	87.8	30.0	9.34	4.61	8.37	54.6	187	873	2140	1660	678	266	9
10	86.3	28.7	9.28	4.47	10.0	48.5	201	965	2170	1640	669	259	10
11	84.6	27.7	9.16	4.41	15.8	43.2	211	1100	2170	1640	654	249	11
12	81.9	26.2	9.02	4.26	31.5	39.7	219	1250	2150	1610	633	236	12
13	80.0	25.3	8.88	4.23	43.2	36.0	227	1360	2170	1590	603	226	13
14	76.9	24.5	8.76	4.20	38.7	33.5	262	1420	2260	1560	578	217	14
15	72.3	23.7	8.68	4.05	35.5	33.9	311	1460	2300	1500	550	208	15
16	70.3	22.9	8.31	4.05	31.3	35.0	334	1480	2320	1450	530	197	16
17	68.0	22.2	7.98	4.18	28.6	37.0	344	1480	2320	1420	508	188	17
18	66.3	21.4	7.71	4.05	26.4	39.8	361	1530	2300	1390	483	180	18
19	63.9	20.2	7.63	4.05	26.2	42.1	410	1620	2280	1370	466	174	19
20	61.5	19.5	7.36	4.18	27.0	41.6	507	1680	2290	1370	459	167	20
21	59.2	18.7	7.05	4.05	27.7	50.4	511	1750	2280	1340	452	164	21
22	56.9	17.5	6.78	4.02	28.3	56.8	536	1760	2220	1300	446	164	22
23	54.6	16.7	6.70	3.99	32.0	61.4	555	1770	2120	1260	434	164	23
24	52.4	16.0	6.47	3.84	36.0	66.4	594	1760	2050	1210	420	165	24
25	51.1	15.4	6.39	3.81	41.2	77.4	662	1750	1980	1160	402	173	25
26	50.0	14.7	6.12	3.78	47.3	85.7	685	1750	1950	1100	375	177	26
27	48.1	13.2	5.81	3.63	44.5	114	669	1720	1960	1060	354	165	27
28	47.0	12.9	5.54	3.60	43.4	128	649	1750	2000	1010	334	149	28
29	45.9		5.47	3.60	39.8	124	661	1870	2030	968	326	144	29
30	43.9		5.32	3.60	36.0	120	710	1960	2020	939	313	143	30
31	41.9		5.26		34.6		740	2000		922		140	31
Moy.	72.7	25.1	8.21	4.23	24.9	58.6	378	1390	2130	1470	568	211	Mo

MINIMUM JOURNALIER	3.60 $m^3 s^{-1}$	LE 28 AVRIL
MAXIMUM JOURNALIER	2320 $m^3 s^{-1}$	LE 16 SEPT
DEBIT MOYEN ANNUEL	531 $m^3 s^{-1}$	

Station de Banankoro

Débits moyens journaliers en $m^3 s^{-1}$

Année 1991

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	
1	132	39.9	13.5	7.36	4.74	66.2	108	721	2120	1890	1140	344	1
2	127	38.7	12.6	7.32	4.90	73.1	101	693	2140	1810	1130	335	2
3	123	37	12.3	7.09	5.19	70.2	117	640	2190	1760	1110	324	3
4	116	35.9	11.8	7.05	4.90	63.6	145	589	2200	1700	1080	312	4
5	113	34.8	11.2	7.05	4.66	55.2	175	575	2190	1620	1020	298	5
6	107	33	10.6	7.05	4.52	50.4	224	574	2190	1560	977	290	6
7	102	31.1	10.1	7.01	4.82	48.1	246	575	2170	1540	963	283	7
8	98.9	29.5	10.0	6.78	4.90	47.0	269	603	2140	1570	933	274	8
9	95.7	28.6	10.0	6.70	5.03	45.9	307	647	2130	1650	880	270	9
10	92.4	27.8	9.88	6.43	4.90	43.9	343	710	2100	1810	828	266	10
11	89.1	27.0	9.84	6.16	4.90	42.3	377	839	2080	1910	790	261	11
12	85.0	26.1	9.72	6.08	5.08	43.6	401	1000	2030	1930	774	263	12
13	81.7	25.3	9.60	5.85	5.26	44.3	412	1110	1960	1920	755	263	13
14	78.7	24.5	9.55	5.77	5.29	47.4	443	1190	1900	1920	725	262	14
15	75.8	23.7	9.34	5.54	5.32	53.5	479	1280	1820	1900	690	253	15
16	73.1	22.8	9.30	5.47	5.47	59.6	474	1350	1740	1880	655	243	16
17	70.5	21.6	9.27	5.32	5.50	61.5	468	1430	1680	1840	616	230	17
18	67.8	20.8	9.04	5.55	5.50	62.2	459	1530	1650	1810	581	223	18
19	65.2	20.1	8.86	7.26	5.50	60.2	445	1650	1650	1740	557	214	19
20	62.8	19.5	8.64	7.87	5.58	57.0	449	1740	1660	1640	536	205	20
21	61.4	18.8	8.60	5.17	6.08	55.5	468	1800	1680	1550	520	199	21
22	59.2	18.1	8.56	7.91	6.39	60.2	484	1850	1780	1470	492	191	22
23	56.9	17.3	8.29	7.67	6.47	72.0	511	1870	1860	1410	469	182	23
24	54.5	16.1	7.98	6.82	6.86	86.3	558	1870	1920	1410	448	174	24
25	51.3	15.4	7.67	6.43	7.90	100	594	2030	1970	1420	429	166	25
26	49.1	14.8	7.36	6.06	8.59	108	637	2180	2030	1420	412	161	26
27	48.0	14.3	7.13	5.37	9.16	116	656	2230	2060	1390	392	157	27
28	46.9	14.1	7.28	5.08	9.91	121	618	2280	2050	1330	378	152	28
29	45.0		7.09	4.92	12.6	122	590	2280	2000	1270	363	145	29
30	43.8		7.09	5.00	22.6	115	614	2190	1960	1200	354	141	30
31	41.8		7.32		47.0		685	2160		1160		138	31
Moy.	77.9	24.9	9.34	6.37	7.92	68.3	415	1360	1970	1630	700	233	Mo

MINIMUM JOURNALIER	4.52 $m^3 s^{-1}$	LE 06 MAI
MAXIMUM JOURNALIER	2280 $m^3 s^{-1}$	LE 28 AOUT
DEBIT MOYEN ANNUEL	545 $m^3 s^{-1}$	

Station de Banankoro

Débits moyens journaliers en $m^3 s^{-1}$

Année 1992

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	
1	139	50.4	22.9	7.98	4.02	23.0	264	831	1830	1940	868	337	1
2	135	50.0	21.5	7.71	3.99	26.2	280	825	1910	1880	829	320	2
3	130	49.0	20.1	7.63	3.84	30.0	296	840	2010	1810	773	305	3
4	127	48.0	18.8	7.36	3.81	33.3	325	868	2090	1760	739	291	4
5	123	47.1	17.4	7.09	3.81	38.0	361	898	2140	1690	702	283	5
6	118	46.9	16.1	7.01	3.84	43.5	393	934	2140	1650	676	277	6
7	115	46.0	15.4	6.70	3.99	47.4	409	986	2150	1600	655	269	7
8	111	44.8	14.8	6.12	4.02	53.0	424	1020	2160	1580	634	254	8
9	109	42.9	14.2	5.53	4.02	56.9	432	1090	2180	1550	607	246	9
10	107	40.8	13.6	5.08	4.05	60.3	427	1140	2230	1550	587	236	10
11	103	38.9	13.0	4.66	4.20	63.6	436	1180	2310	1530	560	229	11
12	100	37.9	12.5	4.23	4.23	65.0	462	1230	2350	1470	528	223	12
13	96.2	37.0	12.3	3.82	4.20	64.9	498	1280	2310	1420	529	217	13
14	93.6	36.9	11.2	3.55	4.05	62.8	525	1310	2220	1370	530	211	14
15	89.7	37.0	10.1	3.69	4.05	62.8	545	1310	2110	1320	530	202	15
16	87.4	37.9	9.86	4.34	4.23	70.8	565	1310	2040	1270	557	196	16
17	84.1	38.6	9.72	4.47	4.44	84.0	582	1340	2030	1260	587	191	17
18	83.3	37.9	9.58	4.61	4.69	109	593	1360	2050	1290	612	183	18
19	75.2	36.9	9.42	4.42	5.08	124	610	1360	2090	1330	640	177	19
20	70.7	36.0	9.16	4.07	5.64	127	623	1380	2100	1320	657	171	20
21	68.0	35.7	8.95	4.07	7.09	129	648	1400	2110	1310	627	166	21
22	66.5	33.9	9.11	4.36	8.72	131	661	1410	2130	1270	589	161	22
23	65.2	32.1	9.04	4.26	9.42	135	680	1430	2150	1250	536	154	23
24	63.9	30.9	9.00	4.23	9.90	142	698	1430	2180	1230	486	149	24
25	62.6	29.4	8.90	4.23	10.7	178	698	1440	2190	1180	461	142	25
26	61.5	27.9	8.86	4.23	12.4	221	683	1480	2180	1120	447	137	26
27	60.3	26.9	8.76	4.23	14.1	251	685	1550	2180	1050	430	135	27
28	59.1	25.4	8.72	4.23	15.4	262	694	1610	2120	1010	391	131	28
29	56.9	24.4	8.62	4.20	16.9	262	728	1640	2060	958	374	127	29
30	54.6		8.56	4.05	19.2	258	784	1680	2010	922	360	124	30
31	52.3		8.29		20.4		823	1740		900		125	31
Moy.	89.2	38.2	12.2	5.07	7.37	107	543	1270	2130	1380	583	205	Mo

MINIMUM JOURNALIER	3.55 $m^3 s^{-1}$	LE 14 AVRIL
MAXIMUM JOURNALIER	2350 $m^3 s^{-1}$	LE 12 SEPT
DEBIT MOYEN ANNUEL	532 $m^3 s^{-1}$	

Station de Banankoro

Débits moyens journaliers en $m^3 s^{-1}$

Année 1993

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	
1	143	45.9	17.9	13.4	8.62	12.3	146	631	1760	1740	1140	576	1
2	129	44.9	18.3	12.3	8.74	16.4	170	777	1770	1720	1110	539	2
3	121	43.9	19.4	12.4	8.86	26.3	195	935	1790	1690	1090	496	3
4	117	42.8	20.0	12.4	8.88	27.8	227	1080	1790	1640	1090	457	4
5	113	41.1	20.3	12.4	8.88	27.9	252	1210	1870	1620	1090	425	5
6	109	40.6	21.4	12.4	8.88	28.4	289	1270	1960	1620	1050	396	6
7	105	38.9	21.8	12.4	8.88	27.8	317	1290	2030	1600	1010	371	7
8	102	37.8	19.4	12.4	8.90	27.0	324	1300	2060	1560	979	351	8
9	97.7	36.0	15.8	12.5	9.00	26.4	326	1370	2060	1520	954	337	9
10	95.5	34.9	11.8	13.1	9.14	27.7	324	1440	2070	1470	925	331	10
11	92.4	33.9	11.3	14.1	10.0	28.4	316	1500	2000	1430	887	326	11
12	89.3	32.9	11.9	14.7	12.5	27.6	283	1500	1950	1410	862	313	12
13	86.3	31.1	13.0	14.9	22.2	27.1	264	1460	1900	1390	840	301	13
14	83.3	29.5	14.1	14.5	28.0	37.2	258	1450	1880	1390	820	290	14
15	80.2	28.5	14.2	9.47	28.5	52.6	264	1430	1840	1420	799	280	15
16	77.2	27.1	14.3	8.76	23.1	76.5	261	1380	1810	1450	783	270	16
17	74.4	26.0	14.7	8.99	18.8	94.4	259	1390	1780	1470	746	260	17
18	71.8	24.5	14.2	9.04	18.6	95.3	250	1410	1770	1470	705	253	18
19	69.4	23.0	14.0	9.16	18.1	99.5	248	1410	1760	1460	663	243	19
20	67.8	22.1	16.2	9.28	17.5	96.8	256	1440	1740	1440	638	233	20
21	66.0	20.9	19.8	9.28	17.4	98.8	261	1550	1700	1410	603	226	21
22	61.8	20.1	21.3	9.20	17.5	101	256	1610	1680	1380	575	220	22
23	59.2	19.5	21.5	9.28	18.1	105	253	1640	1680	1350	558	214	23
24	57.0	18.8	21.4	9.30	18.9	116	274	1640	1690	1320	543	208	24
25	55.6	18.1	20.9	9.28	20.0	126	308	1660	1680	1290	526	200	25
26	53.6	17.3	20.8	9.16	20.7	140	362	1660	1680	1250	511	199	26
27	52.2	16.3	20.9	9.00	20.9	146	414	1670	1700	1210	516	195	27
28	50.1	16.8	21.5	8.78	21.5	141	428	1670	1730	1200	545	188	28
29	48.1		22.1	8.72	21.8	138	433	1730	1740	1180	579	179	29
30	47.0		22.4	8.62	19.4	141	463	1910	1740	1170	589	155	30
31	46.1		22.0		15.8		524	1840		1160		164	31
Moy.	81.3	29.7	18.0	11	16.1	71.2	297	1430	1820	1430	791	297	Mo

MINIMUM JOURNALIER	8.62 $m^3 s^{-1}$	LE 30 AVRIL
MAXIMUM JOURNALIER	2070 $m^3 s^{-1}$	LE 10 SEPT
DEBIT MOYEN ANNUEL	527 $m^3 s^{-1}$	

Station de Koulikoro

Débits moyens journaliers en $m^3 s^{-1}$

Année 1990

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	
1	221	103	66.1	97.3	88.4	209	396	944	1990	2630	1230	520	1
2	217	104	63.1	96.5	95.6	231	386	1010	2070	2650	1200	499	2
3	210	104	65.6	103	97.0	240	389	1200	2080	2630	1150	479	3
4	198	105	71.6	105	96.8	247	398	1200	2110	2570	1110	461	4
5	182	103	81.3	109	95.3	253	409	1210	2160	2530	1070	440	5
6	169	98.3	86.9	110	95.3	251	423	1230	2190	2480	1050	432	6
7	166	101.0	87.1	112	99.3	256	442	1240	2210	2520	1000	428	7
8	166	102.0	83.9	112	114	274	464	1220	2260	2490	985	427	8
9	163	94.4	80.7	114	114	285	495	1180	2240	2410	968	427	9
10	161	93.0	80.2	110	103	299	502	1120	2240	2240	934	426	10
11	159	91.4	80.2	103	95.3	294	482	1170	2230	2200	913	421	11
12	157	88.8	79.7	95.1	119	282	455	1220	2280	2190	897	410	12
13	159	82.0	75.8	99.3	129	282	453	1280	2300	2180	875	407	13
14	159	74.4	69.0	107	137	291	521	1340	2310	2150	858	403	14
15	155	65.8	72.7	112	147	277	590	1440	2330	2090	838	395	15
16	144	63.0	77.1	117	156	265	591	1550	2380	2040	807	371	16
17	138	77.0	74.6	122	169	270	587	1600	2410	1960	775	357	17
18	136	84.4	71.1	116	184	248	600	1650	2440	1850	748	343	18
19	134	82.7	69.0	106	197	244	634	1660	2600	1760	718	329	19
20	136	84.1	67.8	106	199	232	664	1680	2780	1700	681	322	20
21	137	87.6	72.1	120	189	227	697	1730	2880	1680	656	323	21
22	132	91.2	83.7	124	163	229	752	1820	2940	1670	633	316	22
23	130	92.5	95.1	121	147	244	903	1890	2920	1660	634	303	23
24	120	89.5	105	116	137	265	1000	1900	2860	1670	633	298	24
25	112	86.5	108	119	162	261	982	1910	2780	1650	619	291	25
26	107	86.9	101	126	182	257	978	1920	2740	1530	610	284	26
27	104	83.2	94.9	129	186	270	1020	1910	2740	1440	590	281	27
28	101	74.6	89.0	129	177	301	1070	1920	2650	1370	570	281	28
29	101		92.4	115	168	380	1050	1920	2540	1320	553	284	29
30	98		101	96.4	183	394	1000	1910	2580	1300	537	290	30
31	99		101		194		969	1940		1240		288	31
Moy.	147	89.0	82.2	112	142	269	655	1510	2440	1990	828	372	Moy.

MINIMUM JOURNALIER	63.0 $m^3 s^{-1}$	LE 16 FEVR
MAXIMUM JOURNALIER	2940 $m^3 s^{-1}$	LE 22 SEPT
DEBIT MOYEN ANNUEL	723 $m^3 s^{-1}$	

Station de Koulikoro

Débits moyens journaliers en $m^3 s^{-1}$

Année 1991

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	
1	274	140	122	143	104	146	258	1030	2430	2880	1620	535	1
2	262	140	122	150	97.5	144	266	1060	2380	2870	1570	522	2
3	253	143	122	142	93.7	152	258	1060	2350	2810	1490	518	3
4	241	145	124	126	85	177	256	1040	2340	2710	1470	495	4
5	230	144	123	113	92.3	202	287	1000	2350	2350	1430	479	5
6	221	135	116	105	97.4	233	319	951	2330	2200	1400	468	6
7	211	131	112	103	108	259	340	898	2310	2100	1360	460	7
8	204	120	123	98.9	138	273	383	882	2310	2050	1320	441	8
9	198	123	132	94.9	153	286	430	890	2290	2000	1270	420	9
10	192	124	136	89.3	145	291	471	895	2340	2070	1190	415	10
11	194	126	136	83.9	132	289	561	913	2660	2120	1100	401	11
12	193	124	133	89.3	122	236	633	946	2990	2250	1050	376	12
13	185	122	117	94.9	112	213	662	1030	3130	2460	1020	371	13
14	179	122	125	98.6	104	206	674	1140	3110	2620	1000	388	14
15	177	120	139	101	94.3	199	686	1260	2880	2610	987	406	15
16	172	122	146	101	91.2	201	698	1360	2530	2450	953	410	16
17	168	126	149	99.3	88.6	219	697	1470	2230	2540	919	402	17
18	167	130	150	89.3	91.6	208	752	1580	2120	2690	883	389	18
19	168	126	137	89.9	100	201	765	1650	2220	2460	832	377	19
20	168	117	119	106	123	200	753	1690	2420	2300	810	359	20
21	166	107	114	123	131	243	734	1780	2510	2180	807	344	21
22	161	116	123	118	123	247	736	1840	2470	2200	805	332	22
23	156	119	135	105	112	227	746	1920	2440	2200	794	324	23
24	154	123	133	105	109	208	753	1970	2450	2080	769	316	24
25	153	128	126	105	106	194	784	1990	2430	1890	684	302	25
26	155	130	121	110	115	181	827	1990	2460	1790	646	289	26
27	154	123	111	116	136	177	1010	2060	2530	1780	619	287	27
28	151	112	106	117	131	220	1050	2190	2650	1780	597	282	28
29	145		102	117	114	247	1010	2300	2770	1770	581	267	29
30	141		105	115	111	254	1020	2400	2840	1720	569	264	30
31	140		124		137		1120	2500		1680		258	31
Moy.	185	126	125	108	113	218	643	1470	2510	2250	1020	384	Moy.

MINIMUM JOURNALIER	82.0 $m^3 s^{-1}$	LE 11 AVRIL
MAXIMUM JOURNALIER	3130 $m^3 s^{-1}$	LE 13 SEPT
DEBIT MOYEN ANNUEL	766 $m^3 s^{-1}$	

Station de Koulikoro

Débits moyens journaliers en m³ s⁻¹

Année 1992

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	
1	250	156	153	123	156	158	508	1020	1880	2910	1230	571	1
2	247	154	152	131	162	156	510	1050	1940	2770	1160	533	2
3	242	152	148	140	158	168	507	1130	1980	2650	1130	521	3
4	234	152	147	148	147	191	519	1180	2080	2570	1080	509	4
5	225	151	149	161	138	214	555	1130	2200	2580	1060	494	5
6	208	148	150	160	138	232	573	1150	2230	2520	1020	477	6
7	195	148	156	153	141	218	586	1150	2300	2470	1000	451	7
8	191	152	160	139	150	202	605	1180	2330	2320	961	419	8
9	192	158	167	131	151	192	648	1210	2330	2240	904	400	9
10	198	157	165	133	157	190	672	1270	2330	2200	875	399	10
11	201	147	154	136	154	199	679	1300	2350	2180	858	402	11
12	201	142	152	138	150	217	684	1330	2520	2150	834	403	12
13	198	135	154	140	149	248	686	1390	2880	2100	814	402	13
14	193	136	150	136	149	267	695	1410	3130	2070	798	392	14
15	185	136	136	121	145	266	702	1450	3250	2020	768	376	15
16	183	138	123	118	143	249	740	1470	3300	1960	744	375	16
17	179	135	115	130	158	244	773	1520	3400	1880	741	359	17
18	177	122	111	139	164	248	799	1560	3380	1760	748	345	18
19	172	112	110	143	142	263	819	1570	3400	1680	793	344	19
20	168	110	108	142	111	285	831	1560	3350	1670	842	346	20
21	165	110	108	138	92.1	296	834	1580	3310	1630	889	339	21
22	160	113	108	129	110	315	845	1600	3310	1660	881	332	22
23	160	124	110	120	125	339	888	1640	3310	1670	870	328	23
24	167	132	110	122	131	318	940	1670	3320	1670	843	319	24
25	168	131	110	139	137	331	963	1650	3360	1670	793	301	25
26	167	131	110	149	138	349	965	1650	3400	1670	739	299	26
27	160	130	110	154	123	368	966	1610	3360	1650	705	302	27
28	154	132	110	155	117	389	970	1630	3320	1580	669	301	28
29	150	139	110	148	128	416	971	1680	3210	1480	666	291	29
30	152		113	147	149	466	973	1740	3090	1410	666	281	30
31	156		119		154		988	1790		1320		277	31
Moy.	187	137	131	139	141	266	755	1430	2850	2000	869	383	Moy.

MINIMUM JOURNALIER	92.1 m ³ s ⁻¹	LE 21 MAI
MAXIMUM JOURNALIER	3400 m ³ s ⁻¹	LE 17 SEPT
DEBIT MOYEN ANNUEL	775 m ³ s ⁻¹	

Station de Koulikoro

Débits moyens journaliers en m³ s⁻¹

Année 1993

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	
1	265	138	125	107	171	186	339	741	1870	2460	1380	718	1
2	265	137	124	133	171	177	326	796	1880	2500	1360	754	2
3	261	131	124	145	168	178	332	859	1900	2420	1350	753	3
4	254	126	122	154	160	179	363	930	1930	2360	1370	729	4
5	250	124	123	153	149	188	397	1040	1920	2500	1370	677	5
6	243	122	131	142	154	193	425	1200	1910	2620	1360	666	6
7	234	119	131	124	171	189	474	1340	1930	2560	1340	616	7
8	222	119	127	118	168	175	537	1440	2000	2390	1320	581	8
9	213	117	127	130	175	161	600	1490	2080	2180	1290	559	9
10	199	113	118	140	183	163	651	1480	2130	2040	1240	542	10
11	189	112	118	146	182	188	657	1540	2180	1940	1230	526	11
12	184	113	131	147	171	214	619	1630	2150	1880	1210	509	12
13	181	119	136	142	181	222	581	1680	2100	1910	1170	484	13
14	178	121	136	133	210	220	558	1710	2080	1970	1100	462	14
15	178	119	133	125	216	233	594	1760	2050	2020	1050	444	15
16	177	114	126	123	211	230	602	1730	1990	2150	1020	436	16
17	172	107	119	128	190	236	610	1670	2000	2240	1010	427	17
18	168	105	115	131	175	238	604	1600	1980	2210	1000	417	18
19	166	108	130	141	163	248	572	1570	1980	2100	977	409	19
20	161	110	142	138	166	289	528	1580	1960	1860	951	400	20
21	159	114	145	135	170	320	497	1670	1980	1750	920	374	21
22	159	111	147	154	167	326	490	1730	2200	1670	886	351	22
23	159	112	133	172	166	318	500	1810	2510	1650	825	348	23
24	159	113	119	174	167	333	513	1870	2670	1610	790	347	24
25	159	117	119	167	161	335	480	1870	2750	1570	780	343	25
26	155	122	122	153	154	329	457	1880	2750	1550	766	339	26
27	148	124	124	143	159	324	473	1880	2600	1520	747	332	27
28	143	123	111	151	163	322	528	1880	2510	1500	725	325	28
29	140		104	154	165	327	573	1910	2450	1460	709	321	29
30	138		101	166	177	348	613	1900	2430	1420	704	321	30
31	138		100		187		687	1870		1400		318	31
Moy.	188	118	125	142	173	246	522	1550	2160	1980	1060	478	Moy.

MINIMUM JOURNALIER	100 m ³ s ⁻¹	LE 31 MARS
MAXIMUM JOURNALIER	2750 m ³ s ⁻¹	LE 25 SEPT
DEBIT MOYEN ANNUEL	732 m ³ s ⁻¹	

Station de Ké - Macina

Débits moyens journaliers en $m^3 s^{-1}$

Année 1990

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	
1	147	39.0	20.0	20.4	19.2	66.2	114	910	1720	2290	1040	414	1
2	142	27.6	20.3	21.4	14.5	45.8	153	911	1730	2240	974	404	2
3	136	22.7	22.2	20.4	12.9	27.4	213	917	1790	2290	976	370	3
4	132	25.4	26.6	18.0	11.9	19.4	262	924	1910	2380	977	350	4
5	111	31.7	26.9	17.9	11.0	17.8	273	938	2050	2460	978	316	5
6	87.0	38.3	25.7	20.9	13.4	17.4	268	1000	2090	2470	959	293	6
7	70.1	41.3	24.9	21.1	17.5	17.3	262	1060	2030	2420	907	299	7
8	72.8	41.0	24.0	20.8	18.1	20.2	273	1070	2000	2320	866	308	8
9	85.2	40.1	20.8	20.5	18.8	30.7	301	1050	1980	2250	829	307	9
10	94.7	39.4	18.3	19.9	20.1	50.3	308	1090	2030	2200	779	305	10
11	101	41.8	18.9	19.9	21.8	90.8	318	1120	2100	2100	764	299	11
12	99.0	34.1	18.2	20.1	20.3	149	322	1120	2110	1940	747	296	12
13	93.7	26.4	17.9	20.4	19.6	235	328	1090	2040	1840	665	296	13
14	88.5	27.3	18.4	22.2	19.1	299	344	1040	2000	1850	572	300	14
15	94.6	31.8	18.6	25.0	18.7	242	357	1020	2040	1880	569	301	15
16	95.0	32.3	19.0	27.6	16.7	185	393	1010	2090	1830	599	301	16
17	87.1	32.0	18.6	28.7	14.0	156	401	1100	2120	1710	610	303	17
18	79.4	31.8	19.2	30.1	13.1	155	394	1280	2130	1730	617	295	18
19	75.6	31.5	19.4	31.9	12.4	155	402	1460	2170	1800	621	285	19
20	77.7	31.1	20.0	32.6	11.9	141	426	1540	2250	1800	609	270	20
21	81.2	30.3	19.7	32.2	11.1	110	485	1580	2390	1720	591	252	21
22	80.9	29.3	18.9	31.3	9.8	102	549	1540	2570	1620	570	215	22
23	80.0	25.6	18.1	31.0	10.2	98	582	1470	2750	1390	516	171	23
24	79.1	21.9	17.4	30.0	12.5	95.4	561	1520	2840	1220	462	163	24
25	77.0	20.2	16.4	29.2	18.3	93.3	580	1620	2760	1360	433	167	25
26	68.1	19.8	15.2	29.3	28.6	94.0	674	1680	2650	1450	414	167	26
27	61.6	19.9	16.0	29.6	46.6	95.7	844	1790	2530	1460	421	167	27
28	59.7	20.0	17.3	30.1	71.5	101	984	1860	2450	1430	428	166	28
29	59.8		17.6	28.8	81.1	102	965	1830	2410	1240	425	166	29
30	59.3		17.4	25.8	79.9	105	917	1750	2370	1140	419	164	30
31	53.2		18.9		76.4		910	1700		1180		155	31
Moy.	88.0	30.5	19.7	25.2	24.9	104	457	1290	2200	1840	678	267	Moy.

MINIMUM JOURNALIER	9.78 $m^3 s^{-1}$	LE 22 MAI
MAXIMUM JOURNALIER	2840 $m^3 s^{-1}$	LE 24 SEPT
DEBIT MOYEN ANNUEL	588 $m^3 s^{-1}$	

Station de Ké - Macina

Débits moyens journaliers en $m^3 s^{-1}$

Année 1991

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	
1	152	41.2	33.9	28.5	25.9	13.4	64.9	1040	2310	2410	1580	393	1
2	155	31.5	34.1	27.0	30.3	15.3	58.5	1140	2420	2520	1500	383	2
3	158	31.8	35.5	26.8	32.0	23.1	58.4	1090	2350	2620	1390	379	3
4	168	42.1	37.0	26.9	32.6	28.8	61.0	1050	2230	2620	1370	367	4
5	170	47.8	38.0	27.0	32.9	28.8	68.0	1010	2160	2610	1380	368	5
6	168	47.5	37.9	27.1	33.5	30.1	80.4	1010	2130	2490	1320	369	6
7	165	43.3	37.5	27.2	31.3	32.7	125	1000	2150	2240	1200	369	7
8	163	35.2	36.4	27.4	24.1	35.8	172	961	2190	1900	1200	369	8
9	159	30.3	35.6	28.3	17.6	42.5	184	898	2160	1600	1230	369	9
10	157	30.3	32.8	28.5	14.0	67.8	185	828	2140	1450	1220	367	10
11	149	34.2	31.1	29.3	11.4	84.1	191	729	2120	1490	1090	356	11
12	110	34.8	30.1	29.2	10.4	106.0	204	663	2140	1660	908	347	12
13	63.1	33.6	25.8	28.9	9.9	122.0	262	643	2290	1830	852	343	13
14	62.1	33.7	20.1	28.1	9.5	126.0	389	652	2640	2000	855	342	14
15	63.5	34.1	17.7	24.4	9.8	128.0	477	706	3010	2240	790	332	15
16	68.4	35.9	16.9	20.6	9.8	127.0	473	801	3010	2470	774	326	16
17	68.8	38.5	17.6	19.5	9.6	124.0	469	986	2740	2580	805	317	17
18	68.3	39.4	19.5	19.1	9.0	119.0	489	1330	2340	2560	813	309	18
19	67.8	39.2	20.1	18.7	8.9	119.0	514	1670	1930	2430	808	291	19
20	67.1	38.8	20.3	17.4	8.9	118.0	542	1690	1680	2450	798	267	20
21	65.5	37.9	20.9	16.7	8.9	114.0	595	1550	1650	2440	764	267	21
22	65.2	34.0	19.0	16.4	8.9	104.0	564	1630	1920	2260	698	266	22
23	65.0	31.6	17.9	16.8	8.5	92.5	555	1730	2170	1940	659	262	23
24	63.6	30.9	22.6	16.0	8.2	85.4	571	1840	2280	1720	656	254	24
25	63.2	32.9	30.9	14.9	8.3	85.3	605	1980	2250	1790	649	228	25
26	61.8	33.8	33.3	13.1	8.4	88.2	624	2120	2210	1920	634	195	26
27	61.4	33.9	33.4	11.1	9.0	90.5	621	2060	2190	1870	598	191	27
28	60.2	33.9	32.5	10.7	9.1	89.2	621	1950	2160	1550	561	194	28
29	59.7		32.1	14.0	9.1	84.7	669	1930	2170	1330	533	193	29
30	57.5		31.0	22.4	9.3	76.8	761	1970	2270	1460	464	186	30
31	52.6		29.9		10.7		884	2100		1560		173	31
Moy.	99.3	36.1	28.4	22.1	15.1	80.0	391	1310	2250	2060	936	302	Moy.

MINIMUM JOURNALIER	8.22 $m^3 s^{-1}$	LE 24 MAI
MAXIMUM JOURNALIER	3010 $m^3 s^{-1}$	LE 15 SEPT
DEBIT MOYEN ANNUEL	630 $m^3 s^{-1}$	

Station de Ké - Macina

Débits moyens journaliers en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$

Année 1992

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	
1	134	93.5	20.1	35.5	46.2	39.0	198	859	1700	2850	1190	582	1
2	95.2	102.0	24.4	35.3	46.2	38.8	210	851	1770	2650	1120	572	2
3	85.2	100.0	31.5	35.3	46.2	37.4	231	860	1810	2450	1020	561	3
4	83.8	89.1	37.4	35.3	46.2	36.0	277	875	1930	2280	895	549	4
5	83.8	79.9	43.2	35.5	46.2	34.6	308	938	1970	2160	884	537	5
6	84.1	77.5	48.7	36.6	46.0	34.7	304	1040	1970	2070	857	510	6
7	84.0	76.8	52.6	36.8	44.9	38.1	331	1080	2040	2050	806	488	7
8	82.5	73.6	53.5	36.9	44.9	38.9	362	1050	2190	2080	803	481	8
9	83.0	73.2	53.5	36.9	45.1	41.0	354	1030	2290	2070	820	461	9
10	84.4	73.3	53.5	37.0	45.5	41.4	360	1030	2230	1910	774	408	10
11	88.6	73.4	53.4	37.3	46.6	41.4	396	1030	2260	1770	677	359	11
12	91.6	73.4	53.3	39.0	45.2	41.8	448	1030	2220	1740	621	321	12
13	92.9	73.5	53.3	37.9	38.9	44.9	478	1050	2210	1770	629	294	13
14	90.1	73.3	53.2	37.9	27.3	53.5	496	1110	2320	1800	618	285	14
15	89.6	71.9	53.1	38.2	19.4	86.3	512	1190	2610	1850	591	288	15
16	89.6	71.6	53.1	38.4	17.9	125.0	503	1250	2970	1860	597	288	16
17	89.6	71.3	53.0	38.7	22.4	126.0	503	1270	3210	1810	600	284	17
18	89.6	69.8	52.9	39.8	25.1	135.0	506	1330	3270	1720	599	271	18
19	89.6	68.7	52.9	45.4	23.7	150.0	525	1430	3240	1640	595	222	19
20	89.3	61.9	52.6	49.0	19.9	153.0	560	1430	3200	1490	597	193	20
21	87.8	48.5	51.3	50.4	18.0	140.0	634	1390	3130	1270	644	203	21
22	90.5	41.6	50.6	51.1	15.5	126.0	713	1400	3050	1130	696	165	22
23	91.5	40.3	46.2	49.1	17.1	109.0	730	1410	2990	1140	680	161	23
24	94.7	40.1	36.4	47.7	23.3	89.4	686	1440	2950	1320	650	164	24
25	96.2	36.4	26.9	47.5	29.9	80.6	684	1490	2940	1530	598	168	25
26	93.4	27.6	20.6	47.5	37.3	94.2	701	1630	2940	1580	568	171	26
27	92.5	20.6	18.6	47.5	41.3	143.0	740	1690	2960	1580	579	174	27
28	90.0	20.1	18.2	47.3	40.5	154.0	799	1660	3000	1530	592	178	28
29	89.6	19.7	18.9	46.4	39.2	193.0	831	1590	3000	1460	585	189	29
30	89.3		24.8	46.2	39.0	190.0	868	1550	2950	1410	583	217	30
31	88.1		34.9		39.0		884	1580		1310		249	31
Moy.	90.4	63.5	41.8	41.4	35.0	88.5	520	1240	2580	1780	715	322	Moy.

MINIMUM JOURNALIER	15.5 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	LE 22 MAI
MAXIMUM JOURNALIER	3270 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	LE 18 SEPT
DEBIT MOYEN ANNUEL	627 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	

Station de Ké - Macina

Débits moyens journaliers en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$

Année 1993

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	
1	260	46.4	22.6	40.5	19.1	54.5	157	414	1720	2260	1300	531	1
2	249	46.2	22.6	30.0	19.2	55.2	195	438	1750	2200	1240	525	2
3	237	46.0	22.6	22.5	19.7	59.6	202	454	1890	2160	1200	533	3
4	225	44.9	22.5	20.9	21.2	59.9	202	507	1920	2090	1220	536	4
5	200	44.7	21.9	21.0	22.8	56.4	202	629	1850	2050	1220	538	5
6	170	44.7	23.0	20.6	27.9	50.4	199	728	1810	2060	1190	540	6
7	163	44.7	29.1	20.9	46.7	45.0	198	718	1790	2130	1180	545	7
8	162	44.7	33.4	21.4	59.3	43.1	200	771	1750	2270	1210	568	8
9	159	44.5	30.7	21.6	59.3	43.1	222	1000	1710	2400	1230	615	9
10	155	43.5	28.4	22.4	59.2	43.3	268	1380	1760	2350	1230	642	10
11	149	43.2	26.7	23.0	60.5	43.5	305	1490	1850	2160	1210	594	11
12	122	43.2	26.6	23.4	60.0	43.7	325	1390	1920	1880	1170	536	12
13	90.1	43.1	29.2	23.8	58.2	43.9	372	1360	1950	1520	1110	474	13
14	85.6	43.1	31.7	24.1	52.0	44.1	450	1370	1990	1350	1060	377	14
15	84.9	43.0	32.2	26.0	45.8	44.6	493	1430	1950	1340	1030	285	15
16	84.3	43.0	33.5	36.3	43.0	46.3	506	1540	1850	1690	987	219	16
17	82.9	42.4	32.4	41.9	42.9	44.8	474	1690	1830	1870	938	280	17
18	80.8	39.2	31.3	42.5	43.1	47.8	452	1810	1810	1950	861	370	18
19	80.0	35.2	27.5	42.2	43.4	63.3	448	1830	1750	2090	791	400	19
20	80.0	31.6	23.4	41.9	43.6	76.6	403	1690	1670	2230	789	387	20
21	79.0	27.3	22.7	41.5	44.0	75.6	318	1550	1630	2150	834	377	21
22	77.9	26.7	23.0	40.6	45.1	76.8	310	1490	1620	1840	838	370	22
23	77.9	28.4	23.9	36.0	45.2	77.4	318	1520	1670	1420	799	364	23
24	77.9	25.3	29.8	31.9	45.1	77.7	321	1520	1770	1270	698	345	24
25	77.9	23.5	41.6	31.2	44.9	78.9	298	1600	1940	1260	619	300	25
26	76.9	22.7	44.7	31.0	44.8	84.4	292	1710	2300	1270	637	251	26
27	75.8	22.6	45.1	28.9	44.6	85.6	300	1790	2690	1310	644	226	27
28	75.7	22.6	44.5	24.6	44.6	87.3	306	1820	2670	1330	619	208	28
29	72.6		43.0	21.4	48.8	97.6	314	1880	2480	1350	582	198	29
30	64.5		38.6	20.0	54.0	122	341	1930	2350	1360	556	183	30
31	51.1		39.1		54.7		375	1840		1340		175	31
Moy.	120	37.7	30.6	29.1	44.0	62.4	315	1330	1920	1800	966	403	Moy.

MINIMUM JOURNALIER	19.1 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	LE 01 MAI
MAXIMUM JOURNALIER	2960 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	LE 27 SEPT
DEBIT MOYEN ANNUEL	592 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	

Station de Douna

Débits moyens journaliers en m³ s⁻¹

Année 1990

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	
1	27.8	14.7	4.22	0.312	0.006	0.004	12.2	328	595	547	187	70.4	1
2	27.1	13.6	3.92	0.283	0.006	0.004	12.4	347	601	549	178	67.8	2
3	26.4	13.0	3.82	0.098	0.006	0.004	13.7	364	598	540	171	65.8	3
4	26.1	12.9	3.48	0.017	0.006	0.004	16.2	385	594	530	162	63.4	4
5	24.8	12.8	3.17	0.008	0.006	0.004	18.7	422	584	515	157	61.4	5
6	24.0	12.2	3.09	0.008	0.006	0.004	20.0	477	565	502	150	59.2	6
7	23.8	11.6	2.87	0.008	0.005	0.004	26.2	530	549	490	145	58.7	7
8	23.2	11.1	2.79	0.008	0.005	0.004	27.9	579	537	475	140	57.0	8
9	23.0	10.5	2.56	0.008	0.005	0.004	28.7	632	525	462	134	54.6	9
10	22.2	10.0	2.52	0.008	0.005	0.004	29.9	700	514	448	128	53.5	10
11	21.4	9.91	2.45	0.008	0.005	0.032	33.9	760	507	434	123	52.5	11
12	20.6	9.42	2.00	0.008	0.005	0.409	40.6	794	509	420	121	50.9	12
13	19.8	8.94	1.73	0.007	0.005	1.89	49.4	808	520	408	117	49.1	13
14	19.1	8.80	1.67	0.007	0.005	3.18	60.3	814	537	394	114	47.4	14
15	18.9	8.38	1.51	0.007	0.004	4.64	69.6	811	553	382	110	46.3	15
16	18.3	8.25	1.48	0.007	0.004	6.02	78.0	804	566	364	107	44.8	16
17	17.6	7.84	1.45	0.007	0.004	7.73	82.0	796	579	349	105	43.7	17
18	17.4	7.42	1.28	0.007	0.004	8.55	86.8	783	580	336	99.4	42.1	18
19	16.8	7.30	1.23	0.006	0.004	7.43	91.9	761	571	320	95.9	40.9	19
20	16.3	6.89	1.08	0.006	0.004	6.42	98.6	764	560	306	93.0	38.6	20
21	16.1	6.48	1.04	0.006	0.004	5.54	114	767	551	291	90.9	36.9	21
22	15.6	6.36	0.891	0.006	0.004	5.02	126	733	543	277	88.9	36.0	22
23	15.5	5.94	0.846	0.006	0.004	4.32	144	716	537	265	86.7	35.1	23
24	15.6	5.48	0.704	0.006	0.004	3.87	185	701	529	256	84.1	33.6	24
25	16.1	5.07	0.573	0.006	0.004	3.52	249	665	525	246	82.7	32.1	25
26	16.2	4.67	0.555	0.006	0.004	3.72	305	650	525	236	80.8	31.1	26
27	16.2	4.32	0.539	0.006	0.004	5.58	338	621	525	228	78.7	30.3	27
28	16.2	4.27	0.441	0.006	0.004	8.30	345	603	522	218	76.7	29.5	28
29	16.1		0.411	0.006	0.004	10.9	340	595	524	209	74.6	28.7	29
30	15.5		0.326	0.006	0.004	12.1	332	589	539	201	71.9	27.9	30
31	15.0		0.312		0.004		329	589		195		27.2	31
Mo.	19.6	8.87	1.77	0.030	0.005	3.64	119	641	549	367	115	45.7	Mo.

MINIMUM JOURNALIER	0.004 m ³ s ⁻¹	LE 03 JUI
MAXIMUM JOURNALIER	814 m ³ s ⁻¹	LE 14 AOU
DEBIT MOYEN ANNUEL	157 m ³ s ⁻¹	

Station de Douna

Débits moyens journaliers en m³ s⁻¹

Année 1991

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	
1	26.2	8.87	1.51	0.008	0.005	9.17	33.1	243	799	718	320	119	1
2	25.5	8.32	1.45	0.007	0.005	34.7	33.9	310	841	695	313	115	2
3	24.7	7.78	1.28	0.007	0.005	44.7	38.9	392	883	676	303	109	3
4	23.9	6.95	1.23	0.007	0.005	46.1	41.0	484	926	653	295	106	4
5	23.1	6.48	1.08	0.007	0.004	44.7	42.4	529	958	630	285	101	5
6	22.2	6.42	1.06	0.007	0.004	42.9	46.1	534	978	611	278	98	6
7	21.4	6.42	1.04	0.007	0.004	41.2	48.1	515	991	589	271	94.9	7
8	20.6	6.36	0.871	0.007	0.004	40.3	49.0	498	1010	569	265	92.0	8
9	19.9	5.94	0.723	0.007	0.004	39.3	49.3	479	1000	557	258	89.8	9
10	19.7	5.48	0.684	0.007	0.004	37.6	50.7	470	994	546	249	86.8	10
11	19.0	5.12	0.573	0.007	0.004	35.2	51.0	471	988	537	242	83.8	11
12	18.4	5.02	0.539	0.007	0.004	32.9	51.7	477	972	525	232	80.8	12
13	18.2	4.72	0.441	0.007	0.004	31.1	51.8	479	960	514	224	77.7	13
14	17.5	4.62	0.411	0.007	0.004	29.5	51.9	478	949	504	214	74.8	14
15	16.8	4.32	0.314	0.007	0.004	28.2	52.5	471	934	488	207	72.6	15
16	16.2	4.22	0.229	0.007	0.004	28.5	52.9	468	918	474	198	69.8	16
17	15.5	3.92	0.207	0.007	0.004	28.3	55.3	482	894	460	192	67.7	17
18	14.9	3.82	0.149	0.006	0.004	30.1	57.7	515	878	448	186	66.0	18
19	14.3	3.48	0.131	0.006	0.004	32.4	58.0	536	863	436	179	65.0	19
20	14.2	3.14	0.080	0.006	0.004	42.9	58.0	549	850	423	172	63.3	20
21	14.1	2.87	0.040	0.006	0.003	58.5	58.2	567	840	416	165	61.5	21
22	13.5	2.79	0.035	0.006	0.003	66.9	60.4	584	827	408	158	59.7	22
23	13.0	2.56	0.031	0.006	0.003	69.1	66.0	616	816	402	153	58.1	23
24	12.8	2.45	0.012	0.006	0.003	67.4	68.6	631	809	395	149	57.0	24
25	12.2	2.03	0.008	0.006	0.003	63.4	75.3	635	808	388	144	55.4	25
26	11.6	1.93	0.008	0.006	0.003	59.5	81.0	647	807	379	139	54.4	26
27	11.1	1.73	0.008	0.006	0.003	54.8	87.6	667	792	368	135	53.4	27
28	10.6	1.67	0.008	0.005	0.003	52.5	92.4	684	755	359	131	51.8	28
29	10.4		0.008	0.005	0.003	50.2	94.5	700	761	348	126	50.1	29
30	10.0		0.008	0.005	0.002	46.9	100	725	742	339	122	49.0	30
31	9.4		0.008		0.745		122	755		329		47.5	31
Mo.	16.8	4.62	0.457	0.006	0.028	43.0	60.6	535	885	490	210	75.2	Mo.

MINIMUM JOURNALIER	0.002 m ³ s ⁻¹	LE 30 MAI
MAXIMUM JOURNALIER	1010 m ³ s ⁻¹	LE 08 SEPT
DEBIT MOYEN ANNUEL	194 m ³ s ⁻¹	

Station de Douna

Débits moyens journaliers en m³ s⁻¹

Année 1992

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	
1	49.0	25.6	8.73	1.06	0.008	4.75	20.3	134	350	764	230	85.2	1
2	48.2	25.4	8.32	1.02	0.008	10.5	19.2	144	363	745	228	81.0	2
3	47.3	24.7	7.84	0.747	0.008	20.0	19.1	167	403	719	225	79.5	3
4	46.2	23.9	7.36	0.684	0.008	30.7	19.9	172	471	675	215	77.0	4
5	44.0	23.1	6.95	0.573	0.008	38.6	21.8	169	493	660	202	75.6	5
6	42.9	22.2	6.83	0.539	0.008	41.0	26.4	155	562	647	198	73.7	6
7	42.0	21.4	6.42	0.441	0.008	41.7	32.1	158	602	634	196	71.7	7
8	41.1	20.6	5.94	0.425	0.008	41.0	37.9	160	638	612	189	69.8	8
9	40.3	19.8	5.48	0.425	0.007	44.3	40.3	165	680	585	183	64.7	9
10	39.4	19.0	5.07	0.425	0.007	50.9	41.1	174	701	561	178	66.3	10
11	38.5	18.4	4.67	0.411	0.007	57.1	37.4	178	717	537	172	65.9	11
12	37.7	18.2	4.27	0.326	0.007	58.0	36.0	181	729	499	165	65.0	12
13	36.8	17.5	3.92	0.312	0.007	56.9	35.6	186	735	483	161	63.3	13
14	36.0	16.8	3.82	0.312	0.007	49.7	37.5	190	736	462	155	61.5	14
15	35.2	16.2	3.52	0.29	0.007	44.7	39.0	200	739	437	149	59.9	15
16	34.4	15.5	3.43	0.161	0.007	40.3	42.8	207	742	414	147	59.6	16
17	33.6	14.9	3.14	0.131	0.008	35.8	46.2	215	748	393	141	58.8	17
18	32.8	14.2	2.87	0.085	0.008	30.6	49.6	228	763	371	136	57.1	18
19	32.0	13.5	2.79	0.078	0.008	27.3	61.9	241	783	348	130	55.3	19
20	31.1	12.9	2.56	0.078	0.007	25.5	76.8	251	808	327	125	53.5	20
21	30.3	12.2	2.48	0.078	0.007	23.8	85.9	254	832	319	122	51.8	21
22	29.7	11.7	2.23	0.078	0.007	21.4	89.1	256	846	298	120	50.1	22
23	30.4	11.5	1.96	0.078	0.007	19.1	92.7	258	865	292	117	49.1	23
24	31.6	10.6	1.73	0.072	0.007	17.8	94.7	261	870	281	114	48.1	24
25	30.4	10.0	1.67	0.040	0.007	18.2	94.9	265	866	273	103	46.5	25
26	29.5	9.42	1.48	0.035	0.007	18.5	95.2	269	856	265	92.2	45.6	26
27	28.7	8.94	1.28	0.031	0.007	19.6	97.9	275	841	255	90.8	44.7	27
28	27.9	8.80	1.23	0.012	0.007	19.8	106	293	822	241	100	43.7	28
29	27.1	8.45	1.08	0.009	0.007	19.8	115	310	801	240	100	42.1	29
30	26.4		1.06	0.009	0.007	19.9	121	323	784	235	96.5	41.1	30
31	26.2		1.06		0.590		124	338		230		40.4	31
Moy.	35.7	16.4	3.91	0.299	0.026	31.6	59.9	219	705	445	153	59.6	Moy.

MINIMUM JOURNALIER	0.007 m ³ s ⁻¹	LE 29 MAI
MAXIMUM JOURNALIER	870 m ³ s ⁻¹	LE 24 SEPT
DEBIT MOYEN ANNUEL	144 m ³ s ⁻¹	

Station de Douna

Débits moyens journaliers en m³ s⁻¹

Année 1993

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	
1	38.4	15.0	3.92	0.006	0.002	0.000	0.006	140	535	598	220	81.7	1
2	37.7	14.8	3.82	0.006	0.002	0.000	0.007	151	563	588	212	78.8	2
3	36.8	14.3	3.52	0.006	0.002	0.000	0.094	165	582	578	205	76.7	3
4	35.8	14.1	3.39	0.006	0.002	0.000	1.84	181	600	565	200	74.4	4
5	33.8	13.5	2.91	0.006	0.002	0.000	10.6	187	617	554	194	70.9	5
6	32.8	13.0	2.79	0.006	0.002	0.000	20.9	186	675	542	187	68.7	6
7	32.0	12.8	2.56	0.006	0.001	0.000	27.3	175	700	530	181	67.7	7
8	31.1	12.2	2.45	0.006	0.001	0.000	29.6	164	713	515	175	66.8	8
9	30.3	11.0	2.03	0.005	0.001	0.000	31.3	145	715	502	168	65.9	9
10	29.5	7.22	1.96	0.005	0.001	0.001	29.0	128	712	491	164	65.0	10
11	28.8	9.87	1.96	0.005	0.001	0.001	27.9	116	712	479	158	63.3	11
12	28.6	10.00	1.93	0.005	0.001	0.002	27.8	108	715	468	154	61.5	12
13	27.9	9.42	1.71	0.005	0.001	0.002	32.8	105	719	454	148	59.8	13
14	27.1	8.87	1.48	0.005	0.001	0.002	44.9	106	729	439	142	58.9	14
15	26.4	8.38	1.28	0.004	0.001	0.002	67.4	106	740	424	139	58.0	15
16	26.2	8.31	1.23	0.004	0.002	0.002	82.6	109	760	404	134	57.0	16
17	25.5	8.25	1.08	0.004	0.002	0.002	123.0	113	780	394	131	55.2	17
18	24.7	7.84	1.06	0.004	0.002	0.002	191.0	116	789	380	125	52.8	18
19	23.9	7.36	1.06	0.004	0.001	0.002	235.0	123	796	359	121	51.8	19
20	23.1	6.95	1.02	0.004	0.001	0.002	230.0	132	796	347	116	51.0	20
21	22.3	6.31	0.728	0.004	0.001	0.002	222.0	152	782	338	112	50.8	21
22	22.1	2.80	0.557	0.003	0.001	0.002	194.0	200	751	327	109	50.0	22
23	21.3	2.63	0.441	0.003	0.000	0.002	173.0	288	732	315	105	49.0	23
24	20.0	5.01	0.425	0.003	0.000	0.003	155.0	334	714	301	101	47.3	24
25	19.8	5.07	0.373	0.003	0.000	0.003	126.0	342	691	289	98.1	45.7	25
26	19.4	4.72	0.059	0.003	0.000	0.003	114.0	350	671	276	95.5	44.7	26
27	17.2	4.62	0.007	0.003	0.000	0.003	110.0	375	656	267	91.1	43.8	27
28	16.7	4.27	0.006	0.003	0.000	0.003	115.0	409	634	256	87.9	42.8	28
29	16.3		0.006	0.003	0.000	0.003	123.0	464	620	245	85.8	41.2	29
30	16.1		0.006	0.003	0.000	0.003	130.0	481	609	237	83.8	40.2	30
31	15.5		0.006		0.000		138.0	512		229		38.7	31
Moy.	26.0	8.88	1.48	0.004	0.001	0.002	90.7	215	694	409	141	57.4	Moy.

MINIMUM JOURNALIER	0.000 m ³ s ⁻¹	LE 02 JUINL
MAXIMUM JOURNALIER	796 m ³ s ⁻¹	LE 19 SEPT
DEBIT MOYEN ANNUEL	137 m ³ s ⁻¹	

Station de Akka

Débits moyens journaliers en m³ s⁻¹

Année 1990

Jo	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	Jo
1	510	179	71.6	25.0	47.4	52.1	135	476	1200	1480	1530	1020	1
2	485	181	69.4	25.2	46.2	53.0	117	524	1200	1480	1450	1000	2
3	465	180	64.2	26.6	45.0	52.9	122	565	1190	1450	1480	1000	3
4	431	176	61.1	26.6	43.1	52.5	130	580	1200	1470	1500	977	4
5	413	173	61.3	25.6	41.9	52.5	121	612	1210	1510	1480	969	5
6	396	169	60.1	25.4	41.3	54.5	123	662	1240	1530	1470	954	6
7	390	163	58.4	25.4	40.9	56.0	136	712	1270	1560	1430	906	7
8	376	150	56.8	25.2	38.4	57.7	135	707	1270	1560	1390	896	8
9	361	135	55.1	24.2	35.6	59.4	135	711	1250	1560	1360	893	9
10	347	130	53.5	23.3	33.4	61.3	157	740	1250	1590	1370	848	10
11	332	124	50.9	23.4	31.4	63.9	177	757	1290	1600	1410	809	11
12	313	120	48.7	25.0	29.3	66.1	186	761	1300	1580	1360	821	12
13	312	116	48.0	26.5	27.3	66.9	195	788	1290	1570	1320	810	13
14	315	109	46.8	28.7	25.7	68.7	203	840	1300	1580	1330	774	14
15	293	103	44.6	30.6	24.5	77.0	206	866	1310	1550	1320	736	15
16	274	101	41.6	32.8	23.4	83.2	203	884	1320	1560	1300	700	16
17	267	97.8	40.5	35.0	21.7	85.4	212	926	1350	1590	1290	694	17
18	269	95.8	40.0	34.3	21.9	88.8	228	937	1340	1590	1280	694	18
19	273	93.1	39.2	28.7	25.2	92.6	229	925	1330	1600	1270	680	19
20	268	89.4	36.8	25.1	28.5	96.3	222	951	1330	1580	1260	663	20
21	257	84.4	36.7	25.7	31.0	100	219	1000	1360	1580	1210	647	21
22	253	79.9	36.5	26.7	32.9	108	239	1030	1370	1600	1170	630	22
23	253	78.1	33.0	29.5	35.1	117	279	1040	1360	1590	1160	618	23
24	248	77.1	31.4	31.7	36.3	123	302	1060	1360	1590	1140	629	24
25	243	79.6	31.9	34.0	36.6	125	318	1090	1390	1590	1120	645	25
26	237	83.2	30.6	36.4	36.8	128	319	1080	1430	1590	1110	637	26
27	223	80.7	29.5	38.9	37.6	134	326	1090	1440	1590	1120	600	27
28	205	74.1	28.4	42.1	41.4	140	361	1130	1430	1590	1100	547	28
29	196		27.5	46.1	43.0	147	399	1130	1420	1590	1090	514	29
30	188		26.7	48.1	45.4	151	439	1130	1440	1590	1070	506	30
31	182		25.8		49.7		467	1160		1580		493	31
Moy	309	119	44.7	30.1	35.4	87.1	227	867	1310	1560	1300	752	Moy

MINIMUM JOURNALIER	21.7 m ³ s ⁻¹	LE 17 MAI
MAXIMUM JOURNALIER	1600 m ³ s ⁻¹	LE 11 OCTO
DEBIT MOYEN ANNUEL	556 m ³ s ⁻¹	

Station de Akka

Débits moyens journaliers en m³ s⁻¹

Année 1991

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	
1	460	183	88.9	43.8	39.6	17.5	117	384	1160	1560	1740	1350	1
2	433	180	80.9	49.7	37.1	20.1	119	405	1190	1600	1740	1340	2
3	415	173	79.8	60.4	28.7	20.2	130	437	1190	1620	1730	1330	3
4	409	172	79.6	55.5	20.8	17.8	141	469	1210	1600	1720	1330	4
5	395	160	78.0	52.0	20.5	15.7	144	499	1250	1610	1720	1300	5
6	374	143	76.4	57.0	23.4	13.6	132	564	1260	1660	1710	1260	6
7	331	140	75.3	54.1	25.7	12.5	141	615	1290	1660	1700	1240	7
8	335	141	78.0	53.6	29.5	11.4	138	614	1280	1650	1700	1200	8
9	398	135	84.0	57.6	30.4	11.2	120	653	1240	1670	1690	1190	9
10	333	131	83.7	56.0	33.9	12.2	125	730	1230	1670	1660	1200	10
11	308	128	78.8	53.0	31.1	13.6	135	752	1280	1690	1640	1170	11
12	296	120	77.7	55.5	27.7	14.1	136	742	1360	1690	1600	1150	12
13	290	118	76.4	55.2	37.3	15.8	137	779	1400	1700	1570	1130	13
14	286	118	75.1	49.5	51.1	20.0	138	793	1400	1690	1580	1120	14
15	277	117	77.1	48.2	47.2	24.2	151	787	1380	1690	1610	1080	15
16	272	108	76.5	47.2	39.9	30.1	161	809	1390	1700	1630	1030	16
17	270	107	78.4	47.6	36.7	39.0	157	885	1420	1710	1630	1010	17
18	263	106	76.4	47.8	34.5	53.0	159	920	1430	1740	1620	990	18
19	255	104	74.5	50.6	32.1	66.6	190	893	1450	1750	1570	976	19
20	247	104	72.1	54.2	26.4	77.3	226	895	1440	1760	1520	981	20
21	239	103	63.8	55.3	23.6	94.5	237	912	1440	1740	1540	982	21
22	227	93.7	54.6	48.9	24.1	104	232	947	1480	1730	1530	947	22
23	219	93.1	51.3	49.8	24.8	107	241	937	1530	1720	1490	905	23
24	217	93.6	52.9	50.6	25.4	118	260	936	1510	1720	1480	861	24
25	219	95.1	50.8	47.2	25.0	124	279	986	1500	1750	1460	834	25
26	217	94.4	47.5	43.8	22.5	109	290	1030	1510	1760	1450	816	26
27	208	89.5	45.1	40.3	20.6	109	289	1070	1520	1760	1430	797	27
28	201	91.1	43.6	35.9	19.2	133	310	1100	1540	1740	1390	776	28
29	193		43.3	31.9	19.5	125	349	1100	1560	1740	1370	742	29
30	186		45.2	32.8	21.5	120	387	1130	1550	1760	1360	734	30
31	182		47.1		20.3		394	1130		1750		720	31
Moy	289	123	68.1	49.5	29.0	54.9	199	803	1380	1700	1590	1050	Moy

MINIMUM JOURNALIER	11.2 m ³ s ⁻¹	LE 09 MAI
MAXIMUM JOURNALIER	1760 m ³ s ⁻¹	LE 20 OCTO
DEBIT MOYEN ANNUEL	614 m ³ s ⁻¹	

Station de Akka

Débits moyens journaliers en m³ s⁻¹

Année 1992

Jo	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	Jo
1	679	238	119	88.6	71.3	53.7	134	459	964	1500	1620	1170	1
2	659	223	110	88.7	67.2	54.1	138	475	987	1540	1620	1180	2
3	639	219	109	81.1	67.1	54.6	139	468	1000	1550	1590	1170	3
4	619	215	109	72.3	80.7	55.4	142	504	1010	1590	1580	1130	4
5	598	209	104	68.3	85.8	58.4	149	564	1040	1590	1550	1090	5
6	561	203	94.7	64.1	85.9	59.6	155	603	1050	1590	1560	1080	6
7	511	205	93.9	61.1	86.8	58.3	171	599	1040	1610	1580	1040	7
8	486	208	91.9	58.9	83.2	61.9	188	589	1040	1650	1530	1020	8
9	478	206	83.5	56.6	80.0	63.8	184	616	1080	1630	1540	1020	9
10	459	196	83.8	58.0	78.0	59.8	177	679	1130	1610	1530	992	10
11	438	190	88.4	63.5	76.8	53.9	180	724	1150	1640	1500	976	11
12	409	188	85.6	67.2	77.9	51.5	195	741	1140	1660	1490	976	12
13	388	182	86.8	71.5	80.1	53.0	210	725	1160	1670	1470	961	13
14	380	180	90.9	71.5	77.9	55.1	214	729	1240	1690	1460	941	14
15	365	183	93.2	70.1	75.3	57.7	213	776	1270	1680	1420	904	15
16	347	182	94.8	65.4	75.8	60.4	217	778	1240	1660	1410	867	16
17	323	180	95.2	62.6	75.5	62.5	224	749	1280	1660	1420	847	17
18	313	178	95.9	64.3	70.8	62.4	229	763	1320	1670	1390	827	18
19	307	176	101	67.5	69.5	65.9	238	784	1300	1680	1360	809	19
20	291	170	104	67.0	68.0	70.6	261	788	1320	1680	1360	792	20
21	314	166	105	63.4	66.4	77.0	279	790	1350	1690	1330	774	21
22	351	163	107	60.7	64.9	87.5	293	846	1350	1700	1280	759	22
23	348	153	105	61.8	63.2	96.7	302	925	1390	1700	1270	751	23
24	341	145	95.8	69.1	61.6	100	307	965	1400	1680	1300	708	24
25	336	139	95.7	73.0	59.9	105	337	951	1400	1680	1290	669	25
26	300	134	101	70.9	57.0	122	357	930	1440	1660	1240	658	26
27	280	132	102	69.8	53.3	134	376	937	1460	1660	1200	610	27
28	269	133	99.1	73.0	52.2	131	383	951	1480	1680	1180	570	28
29	267	130	95.4	74.9	52.4	129	400	951	1500	1640	1170	550	29
30	278		93.2	75.0	52.9	130	429	958	1480	1620	1160	559	30
31	271		90.1		53.3		437	957		1620		570	31
Moy	407	180	97.6	68.6	70.0	76.1	247	751	1230	1640	1410	869	Moy

MINIMUM JOURNALIER	51.5 m ³ s ⁻¹	LE 12 JUIN
MAXIMUM JOURNALIER	1700 m ³ s ⁻¹	LE 22 OCTO
DEBIT MOYEN ANNUEL	588 m ³ s ⁻¹	

Station de Akka

Débits moyens journaliers en m³ s⁻¹

Année 1993

Jo	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	Jo
1	540	188	84.2	56.7	65.0	71.6	87.8	314	1070	1460	1560	1180	1
2	499	197	86.8	57.2	59.3	68.3	94.6	337	1080	1470	1550	1180	2
3	489	195	83.3	60.7	55.8	65.8	102	349	1030	1490	1550	1200	3
4	568	192	80.3	65.6	52.2	67.6	109	348	1020	1500	1550	1180	4
5	622	185	80.6	67.3	52.9	71.4	109	356	1100	1490	1540	1150	5
6	562	173	80.3	64.4	53.4	74.8	114	374	1150	1500	1490	1130	6
7	501	162	73.6	62.4	53.9	79.0	122	388	1150	1530	1470	1120	7
8	480	155	68.5	57.0	54.3	80.2	127	404	1170	1520	1490	1100	8
9	451	152	63.9	56.5	54.7	79.9	130	412	1160	1510	1480	1090	9
10	402	150	60.2	55.1	55.1	83.2	144	444	1180	1540	1440	1070	10
11	362	146	61.4	53.7	55.6	83.7	155	469	1170	1550	1440	1070	11
12	346	145	62.7	53.1	56.6	79.2	152	483	1170	1550	1460	1040	12
13	371	147	64.6	53.1	61.2	72.1	150	514	1200	1560	1450	1040	13
14	397	145	62.8	53.3	64.6	70.4	160	540	1260	1550	1420	1020	14
15	335	129	60.2	53.4	64.4	80.7	171	566	1300	1580	1410	975	15
16	318	116	58.6	53.6	59.9	77.5	178	607	1300	1610	1400	935	16
17	335	113	58.0	53.7	62.3	71.6	187	616	1290	1600	1370	912	17
18	314	116	57.8	53.9	71.3	66.2	204	620	1290	1570	1410	905	18
19	304	124	58.1	54.0	74.0	66.2	210	678	1320	1560	1430	956	19
20	310	127	62.7	54.1	76.1	67.1	213	710	1340	1590	1410	981	20
21	309	119	64.0	54.3	76.7	67.0	223	698	1380	1600	1370	936	21
22	276	112	58.3	54.4	76.0	61.7	232	727	1390	1610	1310	853	22
23	255	109	57.8	54.6	75.9	61.1	238	809	1370	1580	1290	809	23
24	249	108	57.6	54.7	76.8	67.3	238	838	1370	1580	1350	821	24
25	250	105	55.3	54.9	74.0	73.6	250	852	1390	1590	1350	810	25
26	243	100	53.7	55.3	76.6	81.2	273	866	1400	1610	1320	777	26
27	228	97.3	53.2	57.6	76.4	88.5	296	869	1390	1600	1310	759	27
28	213	90.1	53.7	59.5	75.4	92.6	308	855	1380	1600	1270	761	28
29	198		54.3	62.4	74.6	98.1	316	883	1400	1600	1260	779	29
30	187		55.1	66.2	74.5	97.1	313	970	1440	1590	1210	783	30
31	180		56.5		75.1		299	1040		1580		746	31
Moy	358	139	64.1	57.1	65.6	75.5	190	611	1250	1620	1430	970	Moy

MINIMUM JOURNALIER	52.2 m ³ s ⁻¹	LE 04 MAI
MAXIMUM JOURNALIER	1610 m ³ s ⁻¹	LE 16 OCTO
DEBIT MOYEN ANNUEL	565 m ³ s ⁻¹	

Station de Diré

Débits moyens journaliers en m³ s⁻¹

Année 1990

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	
1	528	256	94.3	31.1	29.4	22.6	117	411	1090	1400	1410	1130	1
2	541	254	94.7	29.6	30.7	22.4	124	437	1080	1350	1400	1100	2
3	553	232	92.0	28.6	31.7	21.3	126	466	1120	1400	1400	1030	3
4	562	219	82.1	28.2	32.7	20.3	125	504	1140	1400	1400	1040	4
5	553	209	77.8	26.6	33.3	19.3	126	551	1130	1360	1400	1030	5
6	537	191	78.2	26.0	35.6	19.4	126	592	1140	1380	1400	1040	6
7	523	186	72.5	24.6	37.0	19.8	124	612	1170	1430	1370	1060	7
8	509	192	66.8	22.1	38.7	20.2	122	651	1200	1440	1360	1000	8
9	507	193	63.6	20.1	38.6	21.0	120	676	1210	1410	1380	1010	9
10	490	189	59.0	19.6	38.4	23.5	119	677	1200	1400	1380	989	10
11	439	181	53.6	19.5	37.6	29.1	122	706	1220	1420	1370	905	11
12	416	165	53.3	19.4	34.8	32.0	127	719	1260	1450	1330	837	12
13	411	155	53.2	19.4	34.1	34.5	138	753	1280	1410	1310	840	13
14	379	159	52.3	19.8	33.1	37.7	150	779	1280	1400	1300	889	14
15	380	149	52.4	21.1	31.6	40.2	163	800	1310	1410	1290	882	15
16	379	138	48.6	21.2	31.2	41.0	176	845	1280	1460	1270	831	16
17	357	137	46.5	21.1	32.2	40.5	183	848	1230	1480	1190	832	17
18	339	133	47.2	21.1	31.0	39.0	183	875	1280	1490	1220	835	18
19	313	127	47.8	21.0	30.0	37.3	194	900	1280	1490	1250	779	19
20	288	120	46.0	20.9	28.0	37.1	208	890	1290	1450	1280	699	20
21	282	113	43.8	20.9	26.9	38.7	214	903	1300	1460	1300	698	21
22	326	110	41.7	21.8	25.6	42.5	222	937	1320	1470	1240	738	22
23	334	100	40.4	22.2	24.8	50.1	229	980	1330	1480	1200	711	23
24	331	89.4	39.3	22.2	23.9	62.4	243	982	1280	1460	1160	651	24
25	325	92.5	39.5	22.1	24.1	75.6	266	961	1290	1460	1160	593	25
26	319	100	37.3	21.1	23.6	87.5	291	1000	1320	1460	1200	584	26
27	301	100	35.4	22.2	23.5	102	307	1020	1310	1460	1220	718	27
28	289	101	35.0	24.7	23.5	109	295	1040	1320	1460	1210	709	28
29	276		34.2	25.7	23.4	107	309	1090	1360	1460	1160	676	29
30	265		33.2	27.7	22.7	107	338	1100	1420	1460	1130	636	30
31	259		32.2		22.6		373	1110		1440		619	31
Moy.	397	157	54.6	23.0	30.1	45.3	192	801	1250	1430	1290	842	Moy.

MINIMUM JOURNALIER	19.3 m ³ s ⁻¹	LE 05 JUIN
MAXIMUM JOURNALIER	1490 m ³ s ⁻¹	LE 18 OCTO
DEBIT MOYEN ANNUEL	545 m ³ s ⁻¹	

Station de Diré

Débits moyens journaliers en m³ s⁻¹

Année 1991

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	
1	617	236	102	52.8	39.1	23.3	107	342	1080	1500	1660	1620	1
2	582	217	103	48.7	36.6	22.2	115	377	1120	1470	1610	1450	2
3	577	209	101	46.2	36.2	21.0	120	405	1120	1440	1600	1410	3
4	563	198	100	45.1	36.4	18.1	109	417	1140	1500	1610	1400	4
5	523	203	98.2	44.8	36.6	15.1	120	454	1160	1570	1600	1400	5
6	503	209	95.4	43.8	36.6	15.4	134	497	1200	1540	1590	1390	6
7	488	207	93.9	43.5	35.0	15.7	127	534	1240	1520	1580	1410	7
8	461	201	87.8	43.5	32.4	15.5	121	581	1220	1500	1580	1340	8
9	457	190	83.9	43.5	29.3	15.1	136	617	1220	1530	1570	1230	9
10	456	181	80.9	44.8	28.5	13.9	151	611	1260	1560	1560	1210	10
11	434	170	79.3	42.7	27.5	13.8	140	660	1270	1550	1550	1250	11
12	421	167	77.8	40.8	24.9	13.8	133	725	1280	1560	1540	1240	12
13	430	166	76.7	42.9	22.5	13.8	141	701	1280	1590	1540	1150	13
14	431	161	76.5	45.9	22.4	13.8	141	733	1270	1580	1540	1170	14
15	412	156	76.5	48.3	24.3	13.8	132	779	1280	1560	1540	1220	15
16	390	148	76.5	49.8	25.3	13.7	136	784	1310	1530	1540	1130	16
17	385	139	75.5	50.8	28.1	13.3	143	846	1340	1530	1540	1110	17
18	376	133	68.7	48.3	30.7	13.8	145	901	1360	1530	1540	1120	18
19	362	132	64.6	46.3	32.2	14.8	158	872	1350	1540	1540	1110	19
20	341	132	66.2	45.9	33.5	17.4	150	886	1340	1600	1530	1100	20
21	319	124	71.5	45.9	34.0	19.9	167	896	1330	1630	1510	1120	21
22	313	118	75.0	45.6	34.1	26.5	192	917	1350	1630	1490	1130	22
23	302	117	69.9	43.8	32.2	33.6	202	945	1400	1600	1430	1100	23
24	289	115	62.4	42.7	30.5	41.5	208	945	1430	1570	1440	1050	24
25	265	113	62.8	42.5	30.0	51.1	226	934	1450	1570	1440	1010	25
26	263	107	64.0	43.2	28.7	61.9	245	967	1440	1570	1460	938	26
27	266	101	63.1	44.2	28.2	70.3	269	977	1430	1580	1490	889	27
28	234	99	62.2	45.0	27.4	77.3	291	994	1410	1610	1480	899	28
29	218		57.3	43.5	24.5	78.9	313	1050	1430	1600	1420	938	29
30	228		52.8	41.3	23.4	87.8	334	1070	1480	1610	1550	946	30
31	241		53.2		23.1		338	1060		1630		797	31
Moy.	392	159	76.7	45.2	30.1	28.9	176	757	1300	1560	1540	1170	Moy.

MINIMUM JOURNALIER	13.3 m ³ s ⁻¹	LE 17 JUIN
MAXIMUM JOURNALIER	1660 m ³ s ⁻¹	LE 01 NOVE
DEBIT MOYEN ANNUEL	605 m ³ s ⁻¹	

Station de Diré

Débits moyens journaliers en $m^3 s^{-1}$

Année 1992

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	
1	715	353	151	97.5	74.9	44.6	94.8	456	971	1450	1540	1210	1
2	720	360	151	92.0	73.0	42.3	98.4	454	982	1420	1510	1190	2
3	714	340	139	94.4	68.3	43.5	107	480	992	1420	1470	1140	3
4	773	338	134	92.2	67.8	45.6	113	485	1000	1440	1460	1160	4
5	748	331	131	84.5	62.7	48.3	117	500	1010	1450	1490	1230	5
6	694	308	118	83.3	58.2	49.9	124	552	1000	1470	1540	1110	6
7	681	283	112	85.7	60.3	50.1	131	585	1020	1470	1530	989	7
8	617	276	115	83.2	63.7	50.1	135	589	1060	1450	1520	1070	8
9	590	268	109	81.1	64.7	50.1	142	600	1090	1460	1520	1150	9
10	621	259	99.0	77.6	68.0	50.1	152	634	1110	1450	1490	1180	10
11	622	262	95.1	72.4	69.5	50.4	160	680	1120	1500	1480	1130	11
12	547	257	97.4	63.9	68.9	52.4	166	718	1100	1530	1470	1060	12
13	516	249	96.3	54.1	70.0	52.5	172	742	1110	1510	1460	1050	13
14	498	237	95.3	56.5	70.4	52.4	172	741	1150	1510	1440	992	14
15	477	228	96.3	63.0	71.6	52.2	179	758	1170	1550	1390	953	15
16	462	237	93.5	62.9	72.0	52.0	191	780	1210	1560	1390	974	16
17	469	240	91.5	61.4	73.2	51.9	204	791	1240	1570	1350	946	17
18	456	232	90.3	59.3	73.4	51.9	207	806	1230	1550	1290	913	18
19	416	217	92.5	60.6	73.6	52.6	210	804	1240	1540	1320	938	19
20	396	210	97.3	65.0	74.8	51.8	219	813	1260	1560	1340	947	20
21	393	207	98.9	68.1	74.3	50.8	236	832	1240	1600	1290	888	21
22	442	192	95.4	69.5	73.5	51.0	251	861	1290	1620	1290	821	22
23	476	175	93.1	68.1	72.7	53.7	269	927	1310	1630	1320	787	23
24	466	178	97.2	63.8	71.4	55.6	285	953	1330	1610	1290	830	24
25	407	184	100	64.3	67.2	60.4	296	960	1360	1570	1250	856	25
26	388	186	105	65.7	62.8	67.9	315	953	1370	1560	1260	791	26
27	388	188	107	67.1	59.9	72.2	332	924	1330	1560	1250	750	27
28	394	184	108	68.4	57.0	77.0	346	930	1330	1560	1250	746	28
29	377	169	106	69.2	51.8	82.5	370	953	1380	1560	1280	710	29
30	338	104	104	70.6	46.5	89.2	395	966	1440	1580	1250	651	30
31	326	101	101	45.9	45.9	429	964	964	1570	1570	616	616	31
Moy.	520	246	107	72.2	66.5	55.2	213	748	1180	1520	1390	960	Moy.

MINIMUM JOURNALIER	42.3 $m^3 s^{-1}$	LE 02 JUIN
MAXIMUM JOURNALIER	1630 $m^3 s^{-1}$	LE 23 OCTO
DEBIT MOYEN ANNUEL	591 $m^3 s^{-1}$	

Station de Diré

Débits moyens journaliers en $m^3 s^{-1}$

Année 1993

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	
1	589	268	123	47.4	40.8	62.7	68.3	307	960	1350	1500	1260	1
2	606	264	118	45.2	39.9	62.2	79.0	322	994	1390	1500	1230	2
3	643	269	113	45.8	38.7	65.0	72.6	338	1010	1400	1500	1160	3
4	613	252	100	51.4	36.1	65.3	75.8	346	1000	1380	1500	1120	4
5	528	242	95.9	53.3	37.9	62.9	77.8	360	995	1390	1470	1130	5
6	498	233	102.0	51.3	42.3	60.5	85.9	373	1040	1410	1420	1160	6
7	516	220	96.3	52.8	42.7	60.2	93.8	385	1060	1400	1400	1170	7
8	570	216	92.3	54.3	43.8	60.0	95.4	388	1050	1390	1390	1140	8
9	608	218	90.7	57.4	45.1	59.1	94.3	396	1080	1410	1390	1150	9
10	603	205	86.5	58.1	47.3	60.1	94.3	413	1100	1450	1380	1160	10
11	574	190	78.5	58.4	49.4	61.7	97.1	433	1150	1460	1380	1140	11
12	520	182	73.4	58.6	48.9	65.4	107	455	1190	1440	1340	1070	12
13	495	175	69.6	59.3	46.7	69.1	116	475	1140	1440	1340	1040	13
14	483	176	68.6	57.1	41.8	69.7	123	491	1160	1460	1360	1050	14
15	476	179	68.3	53.3	38.2	68.9	137	505	1240	1460	1360	1070	15
16	464	177	65.7	48.4	39.6	69.8	150	534	1230	1470	1380	1060	16
17	424	170	62.9	44.0	39.9	68.7	146	573	1220	1460	1380	1050	17
18	426	164	62.0	42.0	39.9	66.8	149	592	1230	1440	1370	1030	18
19	411	154	63.6	42.4	40.0	63.1	157	617	1260	1460	1340	974	19
20	376	139	62.5	42.1	41.2	61.8	175	655	1290	1440	1310	916	20
21	386	140	65.1	41.3	46.0	62.3	187	687	1290	1450	1330	945	21
22	388	150	65.2	39.8	49.1	63.2	191	700	1310	1500	1320	1000	22
23	380	146	64.8	42.2	50.0	64.0	195	741	1340	1520	1310	965	23
24	354	139	64.3	41.2	51.1	64.9	199	787	1340	1500	1310	876	24
25	318	131	63.8	40.1	50.7	65.8	208	827	1320	1500	1290	871	25
26	316	130	63.4	39.8	52.7	66.9	228	846	1340	1470	1230	911	26
27	293	132	62.6	39.2	55.5	67.1	255	848	1340	1470	1140	839	27
28	281	131	60.2	39.8	60.8	67.1	270	855	1330	1480	1150	829	28
29	292	57.5	40.6	65.1	67.1	263	830	1350	1530	1220	752	29	
30	287	54.7	41.5	63.2	67.1	270	851	1340	1520	1260	724	30	
31	288	51.8	62.8	62.8	289	907	907	1500	1500	720	720	31	
Moy.	452	185	76.3	47.6	46.7	64.6	153	575	1190	1450	1350	1017	Moy.

MINIMUM JOURNALIER	36.1 $m^3 s^{-1}$	LE 04 MAI
MAXIMUM JOURNALIER	1530 $m^3 s^{-1}$	LE 29 OCTO
DEBIT MOYEN ANNUEL	553 $m^3 s^{-1}$	

NOTE PRELIMINAIRE SUR LA CRUE DU NIGER EN 1994

SITUATION HYDROLOGIQUE AU 1^{er} NOVEMBRE

J-C- OLIVRY

Directeur de Recherches de l'ORSTOM

LE NIGER A KOULIKORO

Après un premier pic de crue observé le 28 septembre à $5610 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et une légère amorce de décrue, le remplissage de la retenue de Sélingué et l'ouverture des vannes du barrage ont entraîné l'observation d'un nouveau maximum à $5750 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ les 2 et 3 octobre. La décrue du haut Niger paraissait amorcée ($5610 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ le 6/10) mais les lâchures à Sélingué et surtout de nouveaux épisodes pluvieux sur la Guinée ont entraîné l'apparition d'un second maximum de crue les 14 et 15 octobre à $5660 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

La cote maximale atteinte à Koulikoro le 2 octobre est de 619 cm.

La crue peut paraître exceptionnelle par rapport aux maximums atteints lors des 4 dernières années :

1990	$2940 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
1991	$3130 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
1992	$4300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
1993	$2750 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

En fait, il s'agit d'une crue moyenne dont le maximum est à peine supérieur à la valeur moyenne des maximums observés de 1907 à 1992 (et inférieur à la moyenne établie avant la période déficitaire observée depuis 1972).

La série des maximums annuels du Niger à Koulikoro montre cependant que la crue 1994 est la plus forte observée depuis 1979 ($5930 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et est la quatrième en importance depuis les années déficitaires 1972 et 1973 après 1974 ($6300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), 1975 ($6890 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et 1979, déjà cité. La crue 1994 reste très inférieure à celle de 1967 qui avait atteint $9360 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et aux crues historiques de 1924 et 1925 (9420 et $9650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

La hauteur maximale du fleuve à Koulikoro en 1994 est à 1,90 m en dessous du niveau atteint en 1967. A Bamako, la hauteur à l'échelle a atteint la cote 384 soit 1,15 m en dessous du niveau maximum de 1967.

Pour le Bani à Douna, nous n'avons encore que des données incomplètes. Le maximum aurait été atteint le 26 septembre avec une hauteur à l'échelle de 693 cm et un débit de $1840 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. C'est la plus forte crue observée depuis 1971 ; elle reste cependant inférieure à la valeur moyenne de l'échantillon.

En ce qui concerne les prévisions de l'inondation dans le Delta intérieur du Niger, le modèle de calcul (Olivry) de la surface maximale d'inondation laisse penser que celle-ci excédera les 25.000 km^2 .

LES PRECIPITATIONS A BAMAKO

Comme pour la plupart des régions du Mali, les précipitations ont été excédentaires à Bamako en 1994. Le cumul des précipitations arrêté au 1^{er} novembre 1994 atteint 1260 mm, pour une moyenne interannuelle de l'ordre de 1000 mm. Le caractère exceptionnel de la saison des pluies tient aux mois d'août et de septembre qui avec

respectivement 417 et 344 mm excèdent les moyennes mensuelles interannuelles de 34 et de 68 %.

On a observé 20 jours de pluie en août et 15 en septembre. Le maximum journalier est de 70,4 mm le 26 août. Des averses journalières supérieures à 120 mm ont été mesurées à Bougouni et Kangaba.

Plus que la crue du Niger, dont les effets ne peuvent cependant être occultés dans les quartiers spontanés des zones inondables, c'est l'abondance des précipitations qui est responsable des nombreux dommages subis par les populations au niveau de leurs habitations en banco.

LE NIGER A NIAMEY (ESSAI DE PREVISION)

Indépendamment de la précrue d'été liée aux apports des affluents nigériens en amont de Niamey, la crue annuelle du Niger à Niamey est corrélée aux apports maliens du Niger et du Bani en amont de la cuvette lacustre. La relation établie entre le Niger à Koulikoro et le Niger à Niamey, avec un coefficient de corrélation de 0,72, montre une dispersion des couples de valeurs qui implique de prendre en compte les débits de crue du Bani, l'addition des hydrogrammes du Niger et du Bani et leur forme plus ou moins aiguë, éléments dont on ne peut disposer actuellement.

En considérant que l'hydraulicité du Bani est en phase avec celle du Niger et que les conditions de transfert dans le Delta intérieur n'ont pas fondamentalement changé en vingt ans de déficits hydrologiques, le maximum de crue prévisible à Niamey est de $1800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \pm 150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. La cote atteinte à l'échelle hydrologique de 1972 à Niamey pourrait être de 485-490 cm soit une altitude IGN (1973-1974) de 180 m dans la fourchette ± 20 cm.

Sous réserve des considérations citées plus haut et d'une décroissance extrêmement rapide des débits du bassin amont, telle qu'elle a été observée au cours des dernières années pour les faibles crues, le maximum de la crue a une forte occurrence d'être observé vers le 1er février 1995 à ± 10 jours.

Le fait le plus marquant pour Niamey devrait donc être de reporter l'observation du maximum d'un mois à un mois et demi par rapport aux récentes années. Ces prévisions pourront être précisées à partir de l'observation de la crue du Niger à Diré dont le maximum est attendu dans le courant du mois de novembre.

LE FLEUVE NIGER A KOULIKORO
Débits moyens journaliers pour l'année 1994

Jour	JANV	FEVR	MARS	AVRI	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCTO	NOVE	DECE	Jour
1	297	129	125	137	148	165	582	1330	3040	5540			1
2	291	124	123	138	144	172	606	1330	3120	5720			2
3	286	118	126	137	147	203	630	1330	3340	5750			3
4	274	117	137	132	135	244	655	1310	3740	5720			4
5	265	117	146	120	119	270	679	1310	3840	5650			5
6	238	119	148	113	115	282	703	1320	3810	5560			6
7	230	118	144	101	116	275	727	1340	3740	5230			7
8	227	111	136	97.7	119	259	751	1330	3770	5060			8
9	224	110	125	102	118	259	775	1300	3730	5030			9
10	216	109	121	114	111	274	799	1310	3710	5160			10
11	199	112	132	119	100	305	823	1330	3620	5360			11
12	185	118	138	123	99.2	357	848	1170	3680	5320			12
13	178	119	144	122	122	397	872	1450	3760	5270			13
14	172	116	142	119	134	405	896	1820	3660	5360			14
15	171	117	135	124	131	426	920	2060	3660	5570			15
16	168	119	126	129	123	471	944	2280	3800	5660			16
17	166	124	131	133	111	507	968	2320	4010	5500			17
18	166	137	136	133	106	520	992	2380	4200	5330			18
19	166	142	122	128	117	523	1020	2400	4370	5210			19
20	163	142	122	117	126	507	1040	2420	4520	5160			20
21	157	136	124	119	137	476	1060	2440	4730	5100			21
22	154	120	123	137	143	475	1090	2450	4870	5050			22
23	154	117	117	153	145	525	1110	2330	4950	4980			23
24	156	120	122	160	135	573	1140	2330	5170	4920			24
25	156	128	126	156	116	580	1160	2450	5390	4860			25
26	153	133	133	147	142	579	1190	2430	5540	4660			26
27	147	133	135	142	164	570	1210	2510	5520	4440			27
28	143	132	133	147	170	565	1230	2520	5410				28
29	138		127	152	169	563	1260	2510	5240				29
30	134		127	154	178	562	1280	2480	5350				30
31	133		131		174		1310	2760					31
Moy.	190	123	131	130	133	410	944	1940	4330				Moy.

MINIMUM JOURNALIER : 97.7 m³.s⁻¹ le 12 Mai
MAXIMUM JOURNALIER : 5750 m³.s⁻¹ le 2 Octobre

Débit moyen mensuel (période 1925 - 1991)

					97	322	1110	2920	4880	4180	1910	700	
--	--	--	--	--	----	-----	------	------	------	------	------	-----	--

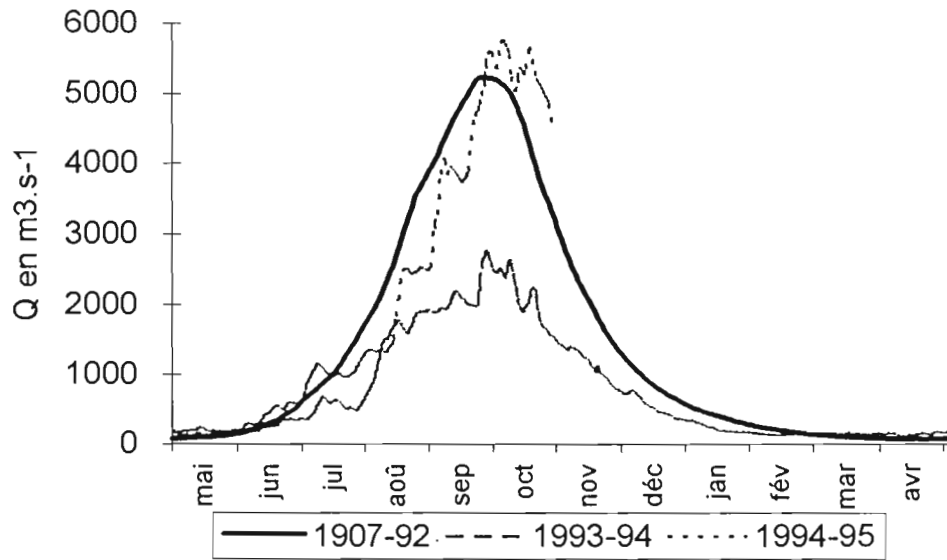
LE FLEUVE NIGER A KOULIKORO
Débits maximums en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ depuis l'origine

Années	Qmax	Années	Qmax	Années	Qmax	Années	Qmax
1907	4240	1929	7480	1951	6420	1973	4310
1908	5530	1930	6820	1952	6240	1974	6300
1909	6930	1931	6450	1953	6930	1975	6890
1910	4790	1932	7630	1954	6480	1976	5080
1911	6720	1933	7310	1955	7300	1977	4140
1912	5540	1934	5880	1956	6220	1978	5510
1913	3580	1935	5750	1957	7420	1979	5930
1914	4430	1936	7410	1958	5570	1980	4550
1915	5230	1937	5090	1959	7130	1981	4710
1916	6010	1938	6380	1960	6730	1982	3770
1917	6870	1939	5610	1961	6340	1983	3640
1918	4940	1940	3940	1962	7960	1984	2350
1919	5320	1941	6180	1963	7400	1985	4490
1920	4940	1942	4870	1964	6820	1986	3720
1921	5330	1943	5170	1965	5890	1987	2980
1922	6380	1944	4880	1966	5710	1988	3730
1923	5440	1945	5180	1967	9360	1989	2700
1924	9420	1946	5520	1968	5330	1990	2940
1925	9650	1947	6220	1969	7890	1991	3130
1926	6970	1948	6530	1970	5860	1992	3400
1927	6930	1949	6880	1971	5700	1993	2770
1928	8520	1950	6400	1972	3840	1994	5750

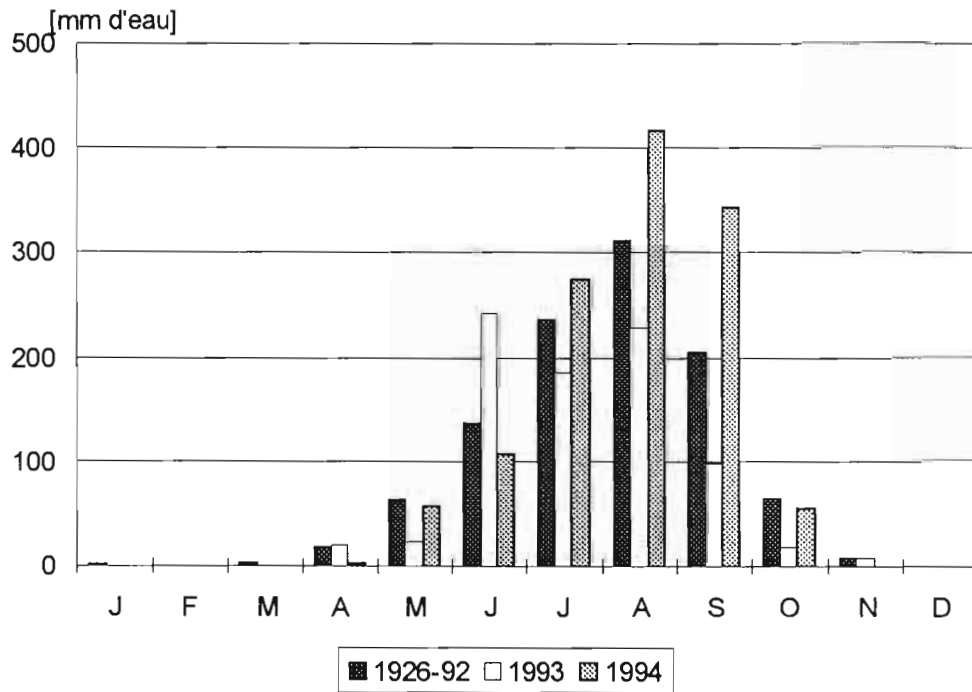
Analyse fréquentielle de quelques paramètres hydrologiques observés
sur le bassin du Niger (modules et maximums)

	Années humides			Médiane	Années sèches		
	100	20	10		2	10	20
Période de retour en années							
Modules en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$							
KOULIKORO (NIGER)	2366	2089	1940	1419	898	750	472
KE MACINA (NIGER)	2259	1985	1838	1322	807	661	387
DOUNA (BANI)	918	854	827	419	153	84	70
DIRE (NIGER)	1753	1521	1399	979	574	462	255
TOSSAYE (NIGER)	1596	1395	1287	908	528	421	219
Maximum de crue en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$							
KOULIKORO (NIGER)	9330	8290	7735	5590	3800	3300	2260
KE MACINA (NIGER)	6534	6240	6060	5470	2950	2590	1990
DOUNA (BANI)	4460	3560	3480	2425	806	565	364
Hauteur Max à Mopti (cm)	759	745	733	655	527	483	394

HYDROGRAMMES DU NIGER A KOULIKORO en année hydrologique



Pluviométrie à Bamako



CENTRE ORSTOM DE BAMAKO

Pluviométrie de l'année 1994

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
1							22.0					
2												
3						1.9		4.3				
4						3.6		15.2	55.0	1.0		
5												
6						17.1	1.5	13.8	1.0	19.3		
7						1.6	20.0	19.8				
8					22.8	18.5	1.0					
9							51.0	20.1	30.5	7.6		
10							0.7					
11						TR		4.3	70.0	1.7		
12						1.6	15.0	1.8				
13								2.4	9.5			
14							24.5	4.0				
15												
16								39.3	5.0			
17							39.0	39.0	1.0	5.8		
18					1.7					4.4		
19				3.0			7.5	38.2		1.3		
20							1.8	46.1	3.0			
21						28.7	2.7	27.9	3.4			
22								6.9	22.0			
23									35.0	14.7		
24						32.3	34.4	17.8	30.0			
25					11.4			8.5	23.6			
26				TR				70.4	0.2			
27						1.5	18.8					
28					15.5			2.5				
29									23.2			
30					5.6		36.9		27.1			
31								34.7				

TOT	0	0	0	3.0	57.0	106.8	274.0	417.0	344.3	55.8		
NJP	0	0	0	2	5	10	15	20	15	8		

Total annuel partiel (31/10/1994) = 1255.9 mm

Maximum journalier 70.4 mm le 26 août

TOT = Total mensuel de pluie en mm

NJP = Nombre de jours de pluie