

A. HASSANE,
M. KUPER,
et D. ORANGE

Laboratoire des Eaux Continentales du Mali
(LECOM), IRD, BP 84 Bamako, Mali
E-mail : kuper@cirad.fr

Influence des aménagements hydrauliques et hydro-agricoles du Niger supérieur sur l'onde de la crue du delta intérieur du Niger au Mali¹

Résumé

La mise en service du barrage de Sélingué sur le Sankarani en 1982, coïncidant avec les sécheresses sahéliennes des années 1980, a entraîné une certaine confusion dans l'esprit des utilisateurs entre l'influence climatique et l'influence des aménagements sur l'apport en eau du fleuve Niger à son delta intérieur. Les principales réclamations des exploitants du delta concernent : (1) la diminution de la disponibilité en eau, entraînant une baisse de la production de poissons, de pâturage et de la surface cultivable, et (2) des fluctuations intempestives du fleuve en étiage entraînant des perturbations de captures de pêche. Le but de cet article est d'analyser l'influence des aménagements sur l'approvisionnement en eau à l'entrée du delta, distinguant les effets naturels des interventions humaines. L'analyse montre :

- Un étiage fortement soutenu par le réservoir de Sélingué. L'eau en provenance de Sélingué est utilisée en grande partie (plus de 50 %) par l'Office du Niger et les périmètres de Sélingué et Baguinéda.

- Des perturbations liées au fonctionnement des barrages de Sélingué et Markala, provoquant de nombreuses oscillations pendant l'étiage à l'entrée du delta.

- Un faible impact des aménagements en période de crue.

- Le barrage de Sélingué ne peut retenir que 7,6 % de l'apport annuel du Niger à Koulikoro.

- Les prélèvements ne sont pas très importants par rapport au volume de la crue : seulement 4 à 18 % de l'apport est prélevé.

La sévérité de l'étiage de 1999 a montré la nécessité d'une gestion intégrée des aménagements du fleuve Niger. Sélingué a turbiné fortement à partir de mi-mars avec des débits au-dessus de 200 m³/s pour atteindre son niveau minimal le 20 mai, entraînant un arrêt brutal des écoulements à Koulikoro et la fermeture du barrage de Markala le 30 mai. A Sélingué, le barrage a été géré en fonction de la demande électrique sans tenir compte du besoin en eau en aval. A Markala, la gestion du barrage s'est faite à partir de l'observation de l'évolution des hauteurs d'eau locales, sans information des écoulements en amont ni en aval.

Abstract

The Sélingué dam on the Sankarani river was put into service in 1982, coinciding with the sahelian droughts of the 1980's. As a result, a certain confusion reigns concerning the influence of the climate and the river hydraulic works on the water resources of the inner delta of the Niger river. The main issues regarding water resources in the delta concern (1) a diminishing availability of water, resulting in a lower production of fish and pasture and a lower cultivable area, and (2) important fluctuations in the water levels, resulting in lower fish catches. This article aims to analyse the impact of the river hydraulic works on the water delivery to the delta, distinguishing between natural phenomena and human interventions. The analysis shows:

- The Sélingué reservoir supports almost completely the low water period. This water is used for irrigation by the different irrigation schemes downstream (Sélingué, Baguinéda, Office du Niger).

- There are important oscillations in the water levels during low water, caused by operations of the different river hydraulic structures.

- A small impact of these works during the flood period:

- The Sélingué dam can only store 7.6 % of the annual Niger river flows at Koulikoro.

- The water taken by the different irrigation schemes constitutes only 4 to 18 % of the discharge at Koulikoro.

The low water period in 1999 has shown the necessity of an integrated management of the different river hydraulic works of the Niger river. Sélingué has released up to 200 m³/s from the middle of March onwards to attain its minimum level on the 20th of May, resulting in an abrupt drop in the discharges of the Niger river at Koulikoro and the closing of the Markala barrage. The Sélingué dam releases have been managed only to satisfy the electricity demand without taking the water demand downstream further down the season into account. The Markala barrage has been managed without any formal information about water deliveries upstream or downstream.

¹Cette étude a été menée dans le cadre du projet GIHREX (Gestion intégrée, Hydrologie, Ressources, Systèmes d'Exploitation) de l'IRD et la zone Atelier du Delta Intérieur du Niger du GIP-HydroSystèmes

INTRODUCTION

Le delta intérieur du Niger au Mali est une vaste plaine d'épandage s'étendant entre Ké-Macina et San au sud et Tombouctou au nord, composée d'un réseau d'affluents, de défluent, de lacs, et de plaines inondables. La régénération annuelle des ressources naturelles du delta, exploitées par les agriculteurs, éleveurs et pêcheurs, dépend largement de la surface inondée et donc de la quantité et de la régularité en amont des apports du Niger Supérieur et du Bani. Un enjeu majeur du développement est de passer de l'exploitation traditionnelle à la gestion des ressources naturelles en tenant compte de la dynamique à long terme de l'environnement (biodiversité, productivité du milieu) et des besoins et des usages des populations (Poncet et Orange, 1999).

Le delta est un milieu vivant sur un rythme saisonnier très prononcé avec des variations inter-annuelles très importantes. Le maximum de la crue depuis 1965 varie entre moins de 2 000 m³/s (crue de 83/84) et 8 000 m³/s (crue de 67/68) à Koulikoro. Les surfaces inondées sont également très variables d'une année à l'autre. Olivry (1995) estime en effet la variabilité de la surface inondée entre 9 500 km² (1984) et plus de 35 000 km² (1967).

Le bassin du fleuve Niger est un hydrosystème particulier, se trouvant en position intermédiaire entre des systèmes quasi-naturels (tel que le bassin de l'Amazone) et des systèmes fluviaux fortement modifiés par l'homme (par exemple, les amé-

nagements sur la basse vallée du Sénégal). Les tous premiers ouvrages hydrauliques construits et aujourd'hui en fonctionnement sont : Sotuba depuis 1928, Markala depuis 1947, et surtout Sélingué depuis 1982. La mise en service du barrage de Sélingué en 1981, coïncidant avec les sécheresses des années 1980, a entraîné une certaine confusion entre l'influence climatique et l'influence des aménagements hydrauliques et hydro-agricoles. Ainsi, la population a-t-elle tendance à mettre la sécheresse sur le compte des aménagements.

Le but de cet article est donc de faire le bilan des influences du fonctionnement de ce réseau d'aménagements sur l'approvisionnement en eau du delta, distinguant les effets naturels des interventions humaines. Ce bilan est d'autant plus important que le bassin du fleuve Niger est la scène de nombreux projets d'aménagements hydroélectrique ou hydroagricole. Il s'agit dans cette étude de déterminer l'ensemble des prélèvements et lâchés d'eau effectués sur le Niger supérieur avant son entrée dans la zone inondable et d'en analyser les conséquences sur l'apport d'eau dans le delta. Une prochaine étape consistera à faire la relation entre l'apport en eau et l'inondation dans le delta.

En résumé, une vision intégrée de l'hydrosystème, de la (ré)génération des ressources naturelles et de leur exploitation s'impose afin de concilier les impératifs de développement et le respect de l'environnement dans l'ensemble du bassin du fleuve Niger (Kuper *et al.*, 1999).

LE BASSIN DU NIGER SUPÉRIEUR ET SES AMÉNAGEMENTS

Le bassin du Niger supérieur

Le fleuve Niger, issu de la dorsale Guinéenne, reçoit cinq affluents majeurs avant sa confluence avec le Bani à Mopti: le Mafou, le Niandan, le Milo et le Tinkisso en Guinée et le Sankarani au Mali (*fig.1*). Son bassin versant à Nantaka (après la confluence avec le Bani) couvre 281 000 km², dont presque la moitié provient du Bani.

La figure 1 présente les stations hydrométriques, équipées d'échelles limnimétriques et gérées par les Directions Nationales de l'Hydraulique (Brunet-Moret *et al.*, 1986). Les apports des affluents respectifs et les prélèvements sont indiqués en km³/an et représentent une moyenne sur la période 1982-1998. Les prélèvements du périmètre irrigué de Baguinéda à Sotuba ont été estimés en s'appuyant sur son débit d'équipement.

Les aménagements

De nombreux projets d'aménagements, de nature hydroélectrique ou hydroagricole, sont envisagés sur le Niger supérieur par les autorités nationales respectives, s'ajoutant aux quatre aménagements existants : les barrages de Dabola, Sélingué, Sotuba et Markala (*tab.1*).

Par ailleurs, il existe plusieurs petits aménagements le long du fleuve :

- Des petits périmètres irrigués. Au Mali, on estime leur superficie totale à plus de 10 000 ha pour les régions de Mopti et

Tombouctou (DRAMR, 1999). Ces périmètres irrigués sont alimentés à partir de motopompes et aucun ouvrage n'existe pour rehausser le niveau d'eau du fleuve.

- De nombreux ouvrages de régulation à l'entrée des lacs et des mares le long du fleuve (e.g. les lacs Oro et Fati) pour amorcer l'entrée de l'eau et retarder la décrue. Les casiers de l'Office Riz de Ségou et de Mopti (d'une superficie cultivée de 30 000 ha en 1996/1997) fonctionnent également selon ce principe.

Le barrage de Sélingué

L'ouvrage de Sélingué est situé sur la rivière Sankarani, affluent en rive droite du Niger à 150 km au sud de Bamako. Son bassin versant couvre une superficie de 34 200 km² soit 30% du bassin amont de Sotuba (114 000 km²). Cet ouvrage réservoir peut retenir 2,167 mil-

liards de m³ à la cote 348,5 m, soit 30 % du volume de l'apport annuel du Sankarani. Mis en service en 1981, la gestion de ce barrage devrait assurer :

- la production hydroélectrique (4 turbines de 11,9 MW),
- l'alimentation d'un périmètre irrigué de 1500 ha, situé juste en aval du barrage,
- la régulation du débit du Sankarani pour la navigation sur le Niger en période d'étiage,
- la promotion de la pêche.

A la construction du barrage de Sélingué, la gestion a été confiée à l'Autorité du Barrage de Sélingué, et ensuite à l'Office des Ressources Hydrauliques du Haut Niger (OHRN) ; actuellement la gestion est confiée à la société Énergie Du Mali (EDM). L'exploitation du barrage de Sélingué fournit à l'EDM une production d'énergie électrique qu'elle distribue sur Bamako, Ségou et Kalana.

Le barrage de Markala

Le barrage de Markala a été construit entre 1935 et 1947 dans le cadre d'un projet ambitieux, qui envisageait d'aménager un million d'hectares pour cultiver du coton et du riz. Aujourd'hui, environ 60 000 ha sont aménagés, cultivés essentiellement en riz (Keita *et al.*, 1999). Cet ouvrage de dérivation se compose d'une digue submersible de 1820 m de long en terre compactée et maçonnée et du barrage proprement dit long de 816 m constitué d'un radier séparé en 14 passes ; entre les 14 passes se trouvent 488 vannes à hausses basculantes de type AUBERT, manoeuvrables par chariot électrique. L'inclinaison des vannes à hausses permet de régler le plan d'eau amont jusqu'à plus de 5,5 m de rehaussement, rendant ainsi possible l'irrigation même en période d'étiage.

Dans la gestion du barrage les contraintes de débits en aval et plus exceptionnellement les contraintes liées à la navigation sur le Niger (déséchouage des bateaux en période de décrue) devaient être prises en compte (SOGREAH, 1992). Le plan d'eau de la retenue est maintenu autour d'un niveau de consigne qui est variable en fonction de la période de l'année et des contraintes d'irrigation. Le niveau d'eau ne doit pas descendre en dessous de la cote 230,10 m en période d'étiage et remonte jusqu'à 300,50 m en période de crue (SOGREAH, 1997). Le réglage de cette cote de consigne s'obtient par manoeuvrage des vannes à hausse mobile. La cote de consigne, qui était de 300,00 m, a été rehaussée de 10 cm après l'aménagement du périmètre de canne à sucre sur le canal

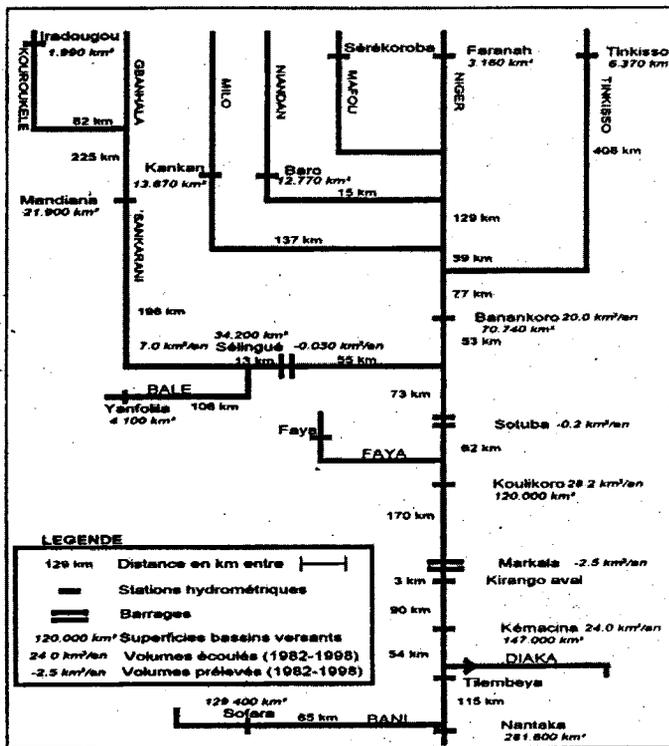


Figure 1. Réseau hydrologique du Niger supérieur, les aménagements et les stations de mesure (Brunet-Moret *et al.*, 1986).

Tableau 1 . Les ouvrages hydrauliques et hydro-agricoles construits ou en projet sur le bassin du fleuve Niger

Nom	État	Objectif	Cours d'eau
Sélingué (Mali)	construit	Énergie, agriculture, pêche et transport	Sankarani
Sotuba (Mali)	construit	Agriculture, énergie	Niger
Markala (Mali)	construit	Agriculture, (énergie en projet)	Niger
Kourouba (Mali)	projet	Énergie	Sankarani
Kénié (Mali)	projet	Énergie	Niger
Tossaye (Mali)	projet	Agriculture, energie	Niger
Talo (Mali)	projet	Agriculture	Bani
Seuil de Djenné	projet	Agriculture	Bani
Dabola	construit	Energie	Tinkisso
Kolenda (Guinée)	projet		Tinkisso
Fomi (Guinée)	projet	Énergie, agriculture, pêche et transport	Niandan
Koumana (Guinée)	projet	Agriculture, énergie	Milo
Kogbédougou (Guinée)	projet	Énergie	Milo

Costes Ongoïba en 1984, ceci pour tenir compte du fait que ce nouveau périmètre est plus élevé que les autres. Les prélèvements en direction des différents périmètres sont commandés par les vannes du point A, point de départ des canaux du Macina, du Sahel, et du Costes Ongoïba (Morell et Grandin, 1981) (fig. 2).

Le barrage de Sotuba

Le barrage de dérivation de Sotuba a été construit entre 1924 et 1929 afin de dévier l'eau dans le canal d'irrigation de Baguinéda pour la mise en valeur de 3 000 ha de périmètre irrigué, situé à 22 km à l'aval. En 1960, l'ouvrage a été adapté pour la production hydroélectrique. L'emplacement de l'ouvrage a été choisi en raison de la présence d'un seuil rocheux et d'îles rocheuses en amont, facilitant l'aménagement d'une prise d'eau. L'usine possède deux groupes générateurs à axe vertical de 2,85 MW chacun ; la hauteur de chute nette extrême relevée indique en saison humide 3,3 mètres et 7,65 mètres en étiage.

Le débit maximum absorbé par une turbine en hautes eaux est de 60 m³/s, l'usine pouvant fonctionner avec un débit minimum du fleuve de 95 m³/s. L'aménagement de Sotuba a produit un rehaussement fixe du plan d'eau de 3,75 m qui permet

de dévier l'eau vers le canal d'alimentation. La courbe de tarage du canal d'irrigation montre un débit maximal de prélèvement de 10 m³/s à la cote 316,25 m ; à cause de la production hydroélectrique, ce débit ne peut excéder 6,37 m³/s.

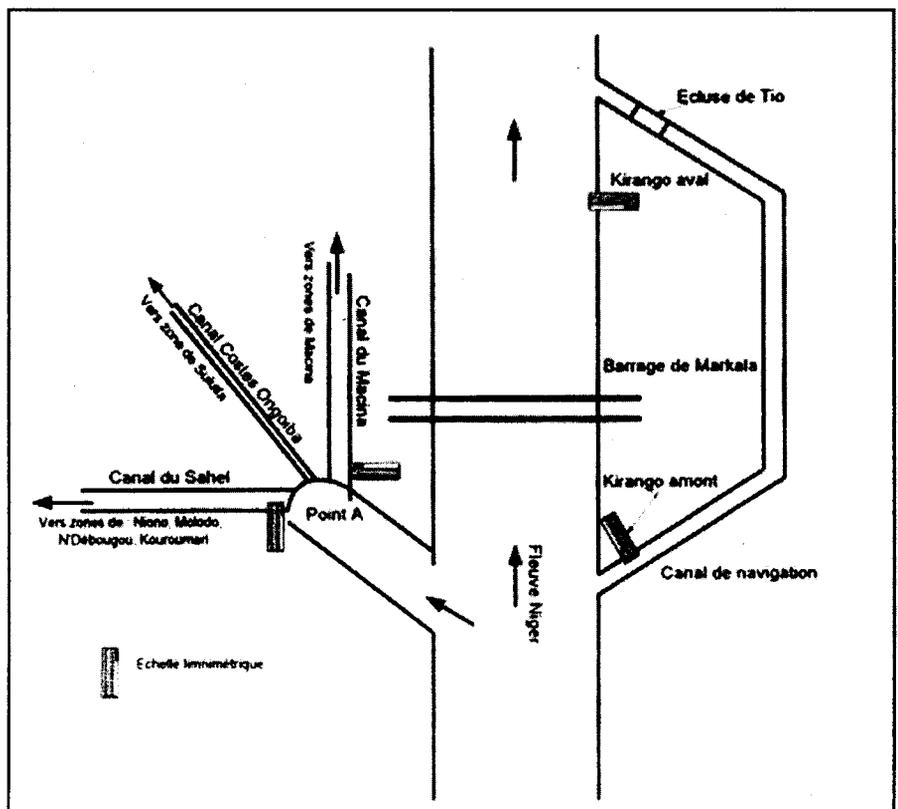


Figure 2. Schéma du prélèvement et de la distribution de l'eau du fleuve à l'Office du Niger à Markala

Le delta intérieur du Niger au Mali

Le delta intérieur du Niger est une aire alluviale que les crues du Bani et du Niger inondent chaque année. L'ampleur annuelle de ces inondations dans l'espace et dans le temps, déjà marquées par des fluctuations saisonnières, est extrêmement variable et gravement affectée par la sécheresse actuelle dans le Sahel (Olivry, 1995). Cependant, depuis 1994, on assiste à une certaine amélioration de l'hydraulicité du fleuve Niger. L'étendue et la pérennité des ressources du delta (eau, sols, plantes, poissons) sont étroitement liées à la dynamique hydrologique du fleuve (le "moteur" du delta, Poncet et Orange, 1999). Les différents systèmes de production dans le delta (agriculture, élevage, pêche) dépendent directement de cette régénération des ressources et sont caractérisés par une forte capacité d'adaptation aux fluctuations saisonnières et interannuelles. Cependant, la productivité des systèmes de production ainsi que le développement viable des sociétés utilisant ces ressources, se heurtent de plus en plus aux contraintes imposées par l'environnement du delta, comme en témoigne un taux d'émigration élevé.

Les aménagements actuels et en projet sur le Niger supérieur et le Bani ont une influence directe sur la dynamique hydrologique du fleuve à l'entrée du delta, sur les inondations et donc sur les ressources naturelles et leur exploitation. Actuellement, les principales réclamations des

hommes du delta concernent :

- une diminution de la disponibilité en eau, se manifestant par une surface inondée réduite et un hauteur d'eau restreinte, entraînant une baisse de la production de ressources naturelles (poissons, pâturage) et du potentiel de production agricole (surface cultivable).
- des fluctuations importantes et aléatoires du débit du fleuve Niger en étiage, entraînant des baisses de capturabilité des poissons.

MÉTHODOLOGIE

L'analyse est basée sur les données hydrologiques des aménagements hydrauliques et des stations hydrométriques sur le réseau hydrographique du fleuve Niger, et consiste en trois étapes (Hassane, 1999) :

- détermination des prélèvements et lâchés d'eau et analyse de la gestion des aménagements,
 - analyse de l'onde de la crue à partir des données hydrologiques (hauteurs d'eau, débits) des stations hydrométriques du bassin du fleuve Niger avant et après l'implantation des aménagements,
 - simulation de la situation hydrologique sans aménagements pour quantifier l'impact des aménagements hydrauliques et hydro-agricoles du Niger supérieur sur l'inondation à l'entrée du delta.
- Les stations hydrologiques ont été sélectionnées suivant des critères de qualité des observations, de durée d'observation et suivant la position de la station par rap-

port à un événement à surveiller. Ainsi, parmi les stations du réseau hydrologique de la République du Mali, nous avons retenu (*fig. 1 et tab. 2*) :

- la station de Banankoro à la frontière du Mali et de la Guinée sur le fleuve Niger pour déterminer les apports interannuels du fleuve ; elle est située à 200 km à l'amont de Koulikoro,
- la station de Sélingué située à l'aval du barrage de Sélingué pour obtenir les débits sortant du barrage,
- la station de Koulikoro comme référence, puisqu'elle offre un siècle d'observations régulières et de qualité,
- la station de Kirango à l'aval du barrage pour étudier le barrage de Markala,
- la station de Ké-Macina, considérée comme l'entrée principale du Niger dans son delta intérieur du Niger.

Les données proviennent de sources différentes et ont été complétées par des missions de terrain. Les données ont été collectées et rassemblées sous une forme exploitable à l'aide du logiciel HYDROM 3.2 qui permet la gestion d'une banque de données hydrologiques (Boyer *et al.*, 1994), selon le schéma fonctionnel ci-dessous (*fig. 3*).

Les données hydrométriques ont été critiquées à l'aide du logiciel HYDROM :

- les lacunes de courte durée

² La cote de repère de l'Office de Niger dite de Sansanding est de 18,70 m au dessus de la cote de nivellement général I.G.N. Dans cet article, on utilise la cote de Sansanding pour toutes les cotes concernant l'Office du Niger.

(moins d'un mois) ont été complétées par interpolation (linéaire ou logarithmique) ;

- la cohérence des cotes de jaugeage avec les relevés limnimétriques a été vérifiée et corrigée si nécessaire ;

- les hauteurs ont été traduites en débits journaliers, puis mensuels pour chaque station de mesure ;

- des graphiques de débits ont été tracés et interprétés.

tance à celles des années précédentes. Le débit moyen annuel de la décade 1981-1990 est de 795 m³/s, celui de 1971-1980 de 1260 m³/s, et celui de 1961-1970 de 1 600 m³/s. Le débit moyen de la décade 1991-2000 sera certainement plus important que celui de la décade précédente. Pour la période 1991-1999, on constate déjà un débit moyen annuel de 1 047 m³/s. Les travaux de Olivry *et al.* (1995), Mahé *et al.* (1997) et de Bricquet *et al.* (1996), ont montré que la diminution de l'hydraulicité du fleuve

lements du fleuve. En effet, Bricquet *et al.* (1996) montrent que pour la crue de 1994/1995, les écoulements n'ont été que de 5% supérieurs à la moyenne de 1951-1990, malgré une pluviométrie supérieure de 15%.

L'hydrogramme de Koulikoro est constitué essentiellement des apports du Niger à Banankoro et de son affluent le Sankarani à Sélingué, comme le montre la figure 5 pour 1997. La figure 5 indique les fluctuations des

Tableau 2. Liste des stations sélectionnées (stations du réseau hydrologique national et stations privées) avec leur état de mise à jour

Station	Type de donnée	Origine	Années
Sélingué	débits, hauteurs	DNHE	1964-1995
		EDM Sélingué	1995-1998
Sélingué barrage	débits, hauteurs	EDM Sélingué	1982-1998
Kirango aval	hauteurs	DNHE	1924-1982
		Office du Niger	1983-1998
Point A	débits mensuels	Office du Niger	1989-1997
Banankoro	débits, hauteurs	DNHE	1962-1998
Koulikoro	débits, hauteurs	DNHE	1907-1998
Ké-Macina	débits, hauteurs	DNHE	1952-1998

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Écoulements et prélèvements actuels

L'analyse de l'état actuel des écoulements du fleuve Niger commence par la reconstitution de l'hydrogramme à Koulikoro, station de référence depuis 1907 (fig. 4). L'analyse de la figure 4 montre que :

- Les étiages à Koulikoro (janvier-mai) sont soutenus depuis l'installation de Sélingué en 1981 :

le débit mensuel descend très rarement en dessous de 100 m³/s. Ainsi, le débit moyen d'avril a augmenté de 50 m³/s (1965-1981) à 130 m³/s (1982-1998).

- Les crues des années 1980 jusqu'à la crue de 1994/1995 ont été nettement inférieures en impor-

tant à celles des années 80 est due aux déficits pluviométriques sur l'ensemble des bassins versants, amplifiée par une baisse des réserves souterraines des bassins versants, ce qui diminue les écou-

lements du fleuve. En effet, Bricquet *et al.* (1996) montrent que pour la crue de 1994/1995, les écoulements n'ont été que de 5% supérieurs à la moyenne de 1951-1990, malgré une pluviométrie supérieure de 15%. L'hydrogramme de Koulikoro est constitué essentiellement des apports du Niger à Banankoro et de son affluent le Sankarani à Sélingué, comme le montre la figure 5 pour 1997. La figure 5 indique les fluctuations des

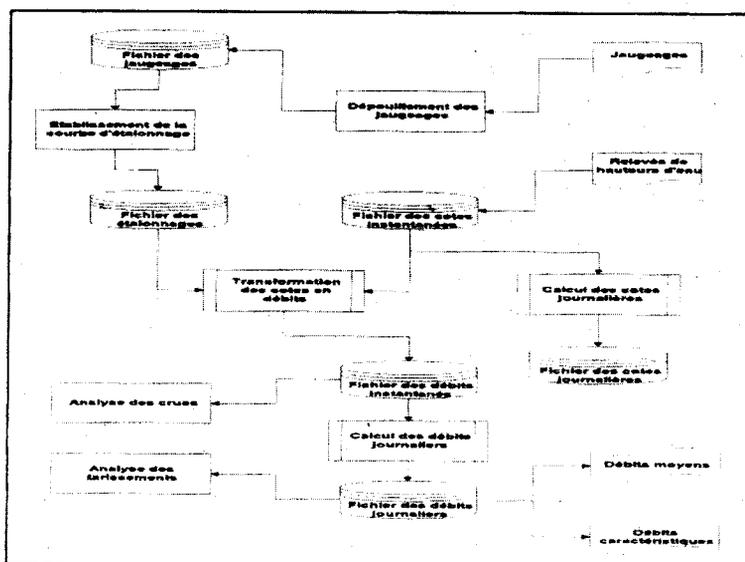


Figure 3. Schéma fonctionnel du logiciel Hydrom 3.2.

remplissage du réservoir jusqu'à son niveau maximal entraîne un retard de la crue actuelle du Sankarani en aval du barrage par rapport à la crue naturelle. Une fois le niveau maximal atteint, l'intégralité de la crue du Sankarani est déversée par les vannes évacuatrices. Les crues sont entrecoupées des montées et descentes correspondant aux lâchés d'eau, effectués pour régulariser le niveau d'eau de la retenue.

Par contre, le signal de Banankoro, très actif pendant la saison humide de juillet à décembre, décrit une courbe assez lisse, reflétant le comportement climatique pur. Son apport est naturel et constitue les 2/3 de l'apport annuel du Niger supérieur. De mars à mai, pendant l'étiage, l'écoulement à la station de Banankoro devient presque nul et tous les débits observés à Koulikoro arrivent de Sélingué (fig. 6).

Le signal de Koulikoro et celui de Ké-Macina sont donc influencés par les apports de Sélingué tout au long de l'année, la courbe réagit à toutes les fluctuations de Sélingué. Cependant, l'effet de ces fluctuations est bien plus important pendant l'étiage (fig. 6).

L'hydrogramme de Ké-Macina, situé en aval de Koulikoro et à l'entrée du delta, suit sensiblement celui de Koulikoro, mais présente cependant quelques perturbations non observées à Koulikoro. Ces perturbations mettent en évidence l'activité du barrage de Markala, qui est situé à 90 km en amont de Ké-Macina. Elles peuvent être occasionnées par les opérations de réhabilitation du barrage de Markala intervenues entre 1996 et 1998.

La figure 7 nous montre l'importance saisonnière des débits sortants du Sankarani à Sélingué, pouvant dépasser 50% du débit

du Niger à Koulikoro au mois de février et approcher les 100% en mois de mars, avril et mai.

Le barrage de Sélingué a un volume stocké maximum de 2,2 km³ pour un apport moyen annuel du Sankarani de 7,0 km³ pour la période 1982-1998, i.e. 30 % de l'apport (tab. 3). Pour la même période, le fleuve Niger observé à Banankoro apporte annuellement 20 km³/an. L'apport moyen à Koulikoro étant estimé à 28,6 km³/an, le volume stocké à Sélingué représente 7,6 % des écoulements moyens annuels du fleuve Niger à cette station de référence. L'influence du barrage de Sélingué se résume donc à :

- un soutien au cours des étiages dont l'importance dépend de la gestion du réservoir du barrage au cours de l'année,

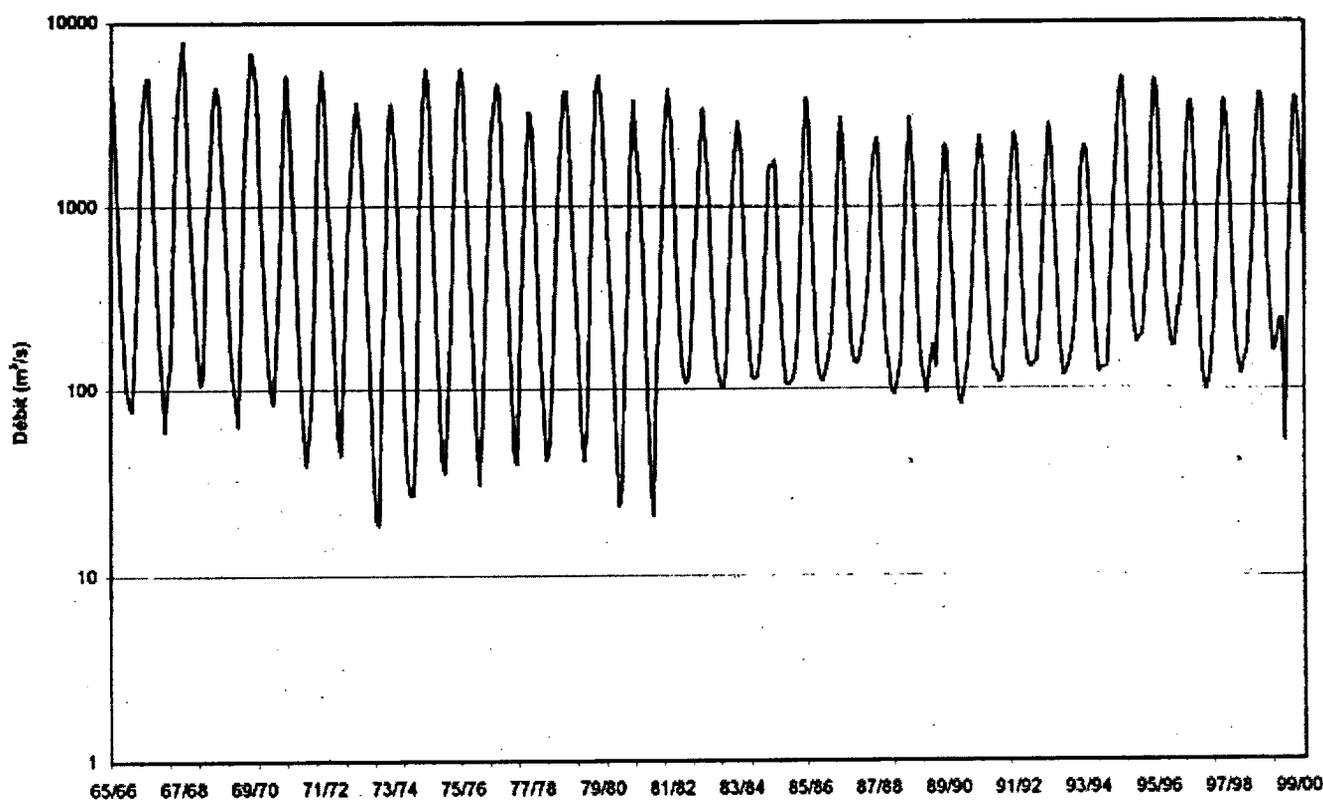


Figure 4. Débits mensuels (en m³/s) à Koulikoro de 1965 à 1999. Sources : DNHE, Marieu et al. (1998)

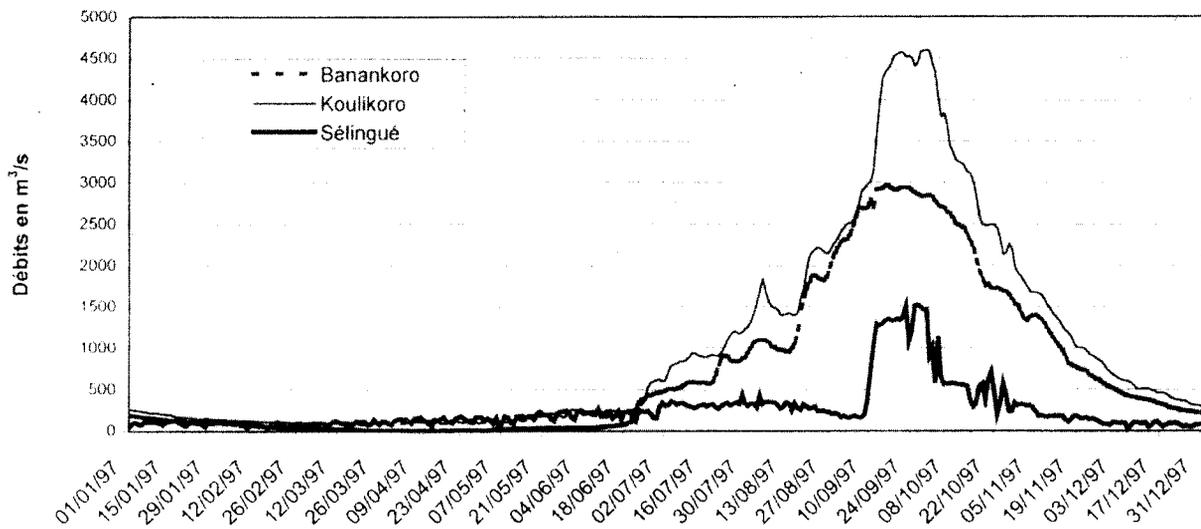


Figure 5. Débits journaliers (en m³/s) en 1997 à Banankoro, Sélingué (aval) et Koulikoro sous l'influence du barrage de Sélingué

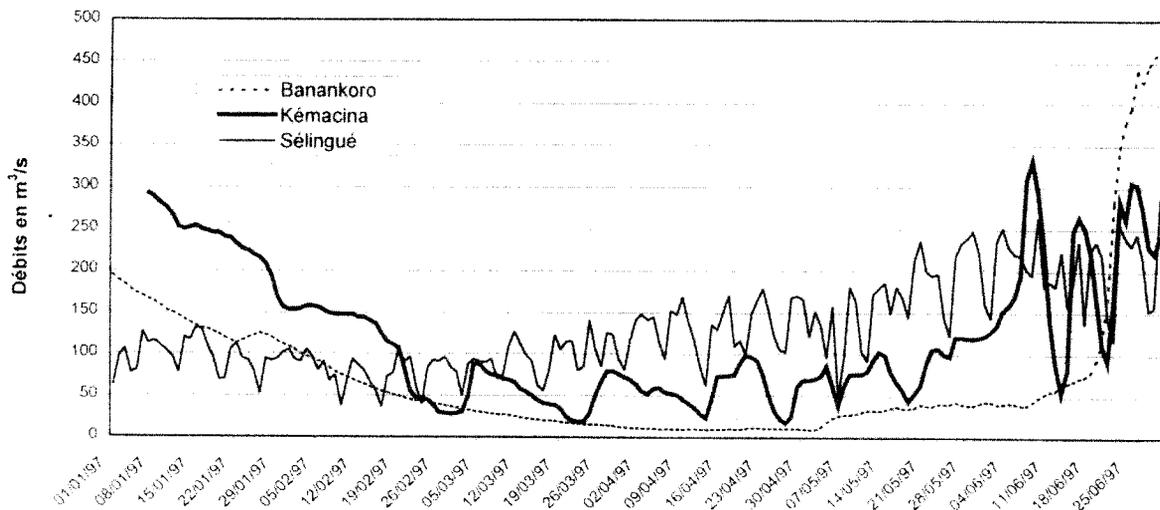


Figure 6. Débits journaliers (en m³/s) en étiage 1997 à Banankoro, Sélingué (aval) et Ké-Macina sous l'influence des barrages de Sélingué et Markala

- un faible impact sur les crues, le barrage ne pouvant retenir que 7,6 % de l'apport annuel du Niger à Koulikoro. Pendant la crue, Banankoro et Koulikoro ont des variations similaires avec des décalages liés au temps de propagation des crues.

L'importance des prélèvements des différents ouvrages hydro-

liques par rapport à l'apport du fleuve à Koulikoro est détaillée dans le tableau 4.

L'analyse du tableau 4 nous montre que :

- Les pertes, *i.e.* le total du volume d'eau retiré au système, sont importantes pendant l'étiage (de janvier à juin) par rapport à l'ap-

port du fleuve Niger à Koulikoro : les différents aménagements retiennent entre 35 et 79 % de l'apport.

- Les pertes (en %) sont relativement beaucoup moins importantes en période de crue (de juillet à décembre), pendant laquelle seulement entre 4 et 18 % de l'apport est retiré.

Tableau 3. Contribution du Sankarani aux écoulements (en million de m³) du fleuve Niger à Koulikoro (1982-1998)

Cours d'eau	Station	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Annuel
Niger	Banankoro	273	103	47	23	57	277	1317	4093	6428	5089	2035	697	20439
Sankarani	Amont Sélingué	99	115	94	67	139	196	450	1454	2286	1440	479	204	7023
Sankarani	Aval Sélingué	195	214	287	329	367	411	464	597	1462	1259	459	246	6290
Niger	Koulikoro	530	361	322	346	427	754	1747	4560	8369	7109	2981	1138	28643

Source : Hydroconsult, 1996 a et b (Amont Sélingué, évaporation) , DNHE (Banankoro/Koulikoro, Aval Sélingué)

- On note l'importance des prélèvements de l'Office du Niger à Markala, constituant 75 % du volume total annuel retiré. Les prélèvements mensuels par rapport à l'apport de la crue à Koulikoro sont présentés par la figure 8.

- Les pertes en eau par évaporation à la surface libre du plan d'eau de Sélingué, évaluée à partir de l'abaque de LOTTI et SOFRELEC (1975), atteignent 569 millions de m³/an (moyenne de 1982-1998), soit le quart du volume total du réservoir.

En juin, le besoin en eau dans le périmètre irrigué de l'Office du Niger augmente avec le démarrage de la principale saison de cul-

ture de riz, puis il augmente à nouveau de juillet à octobre suivant l'augmentation des surfaces emblavées et suite à la diminution des pluies. Cependant, cette forte demande intervient au moment de la crue du Niger et les prélèvements de juillet à décembre restent donc toujours en dessous de 10 % de l'apport à Koulikoro. Pendant la période d'étiage, de janvier à juin, le prélèvement en terme de volume est plus faible, mais représente entre 25 et 50 % de l'apport disponible dans le fleuve, avec un pic en mai. Cet apport en eau doit être assuré par les débits turbinés au barrage de Sélingué.

Il est intéressant maintenant de vérifier quelle est l'influence des

aménagements sur l'onde de la crue à l'intérieur du delta. Nous avons choisi de prendre la station de Nantaka et de faire l'analyse pendant l'étiage, qui apparaît comme la période la plus sensible (fig. 9). Nantaka est situé à 5 km en aval de Mopti sur le fleuve Niger après la confluence avec le Bani et représente donc l'ensemble des écoulements des bassins versants du Niger et Bani (le défluent le Diaka prend un tiers du débit du Niger à Diafarabé, mais uniquement en période de crue).

- L'hydrogramme à Nantaka suit sensiblement l'hydrogramme de Ké-Macina. Néanmoins, les fluctuations observées à Ké-Macina semblent être atténuées à Nantaka.

- La figure montre que l'hydrogramme du Bani à Douna n'a aucune influence sur les écoulements à Nantaka en période d'étiage (de janvier à juin).

Reconstitution des débits naturels à Koulikoro et Ké-Macina

Pour reconstituer le débit naturel à Koulikoro, nous avons adopté la relation établie par Soumaguel (1995), qui a effectué une régression multiple entre les débits à Banankoro, Koulikoro et le débit naturel du Sankarani à Sélingué. Pour déterminer l'apport naturel du Sankarani à Sélingué, nous avons utilisé l'équation du bilan

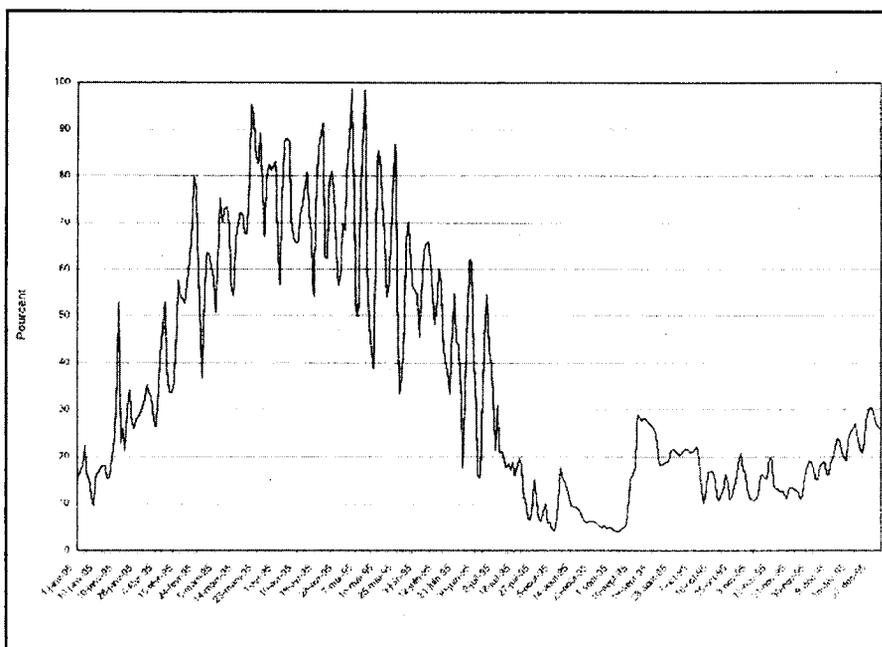


Figure 7. Contribution du Sankarani (barrage de Sélingué) au débit du fleuve Niger à Koulikoro en 1995 (en %)

Tableau 4. Les apports du fleuve Niger à Koulikoro et les différents prélèvements pour la période 1989-1997, volumes en millions de m³

	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
Apports (Va)	568	380	339	368	444	745	1759	4455	8571	7794	3483	1311	30218
Prélèvements périmètres Sélingué	2,2	3,9	5,0	5,1	2,8	0,5	0,7	1,7	2,9	4,4	2,8	1,5	33,6
Baguinéda	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Markala	151	151	167	166	200	218	219	235	321	321	254	160	2562
Evaporation Sélingué	65	66	77	54	39	25	13	16	37	53	62	62	569
Total	236	239	267	243	260	262	251	271	379	396	337	242	3380
Pertes en % de l'apport	42	63	79	66	59	35	14	6	4	5	10	18	11

Source : Hydroconsult, 1996b (Prélèvements Sélingué, évaporation) ; SERP, Office du Niger (Prélèvements Markala)

hydrique en vigueur à Sélingué (Hydroconsult, 1996a). La relation de reconstitution du débit naturel à Koulikoro est de la forme suivante :

$$Q_{Kj} = a Q_{Bj-i} + b Q_{Sj-i} + c \quad (1)$$

Q_{Kj} Débit de Koulikoro (en m³/s) au jour j,

Q_{Bj-i} Débit de Banankoro (en m³/s) au jour j-i, avec i en nombre

de jours

Q_{Sj-i} Débit de Sélingué (en m³/s) au jour j-i, avec i en nombre de jours,

a, b, c sont les paramètres à déterminer par régression multiple entre les termes variables de l'équation Q_{Kj} , Q_{Sj-i} et Q_{Bj-i} , en utilisant la chaîne de traitement de Bader (1992). La régression de Soumaguel (1995) donne des valeurs différentes pour le

temps de propagation i entre les hautes eaux (temps de propagation plus rapide) et les basses eaux :

De janvier à juin :

$$Q_{Kj} = 1,157Q_{Bj-3} + 0,213Q_{Sj-3} - 7,964 \quad (2)$$

(R² = 0,999)

De juillet à décembre :

$$Q_{Kj} = 0,948Q_{Bj-2} + 1,171 Q_{Sj-2} + 17,94 \quad (3)$$

(R² = 0,991)

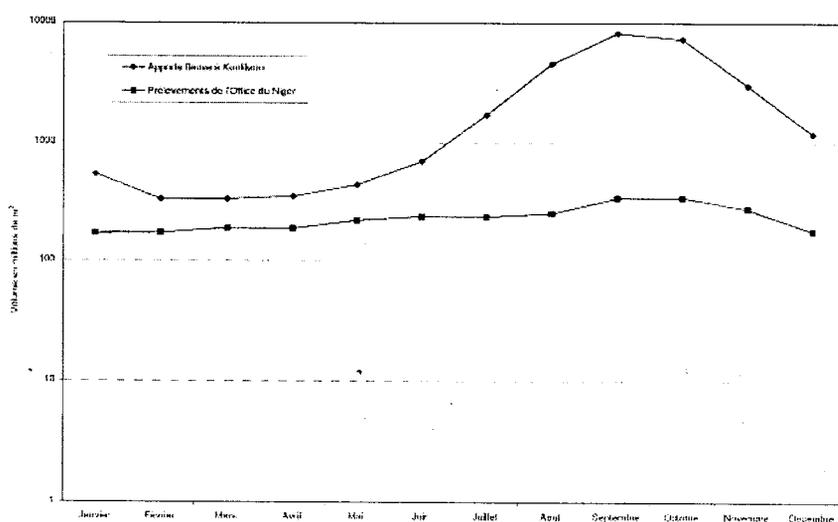


Figure 8. Les apports du fleuve Niger à Koulikoro et les prélèvements de l'Office du Niger à Markala (volumes mensuels en million m³), moyenne pour la période 1989-1997

Nous ne disposons pas de série de données fiables à Ké-Macina antérieure à la construction du barrage de Markala et ne pouvons donc pas reconstituer les débits naturels à cet endroit. En revanche, nous avons développé une relation entre le débit à Koulikoro et à Ké-Macina pour la situation actuelle, c'est à dire avec le barrage de Markala. Avec cette relation nous pouvons donc déterminer les débits à Ké-Macina sans le barrage de Sélingué, en utilisant les débits naturels reconstitués à Koulikoro (équations 2 et 3), mais également avec les barrages de Markala et Sélingué, en utilisant les débits observés actuellement à Koulikoro.

La reconstitution de l'hydrogram-

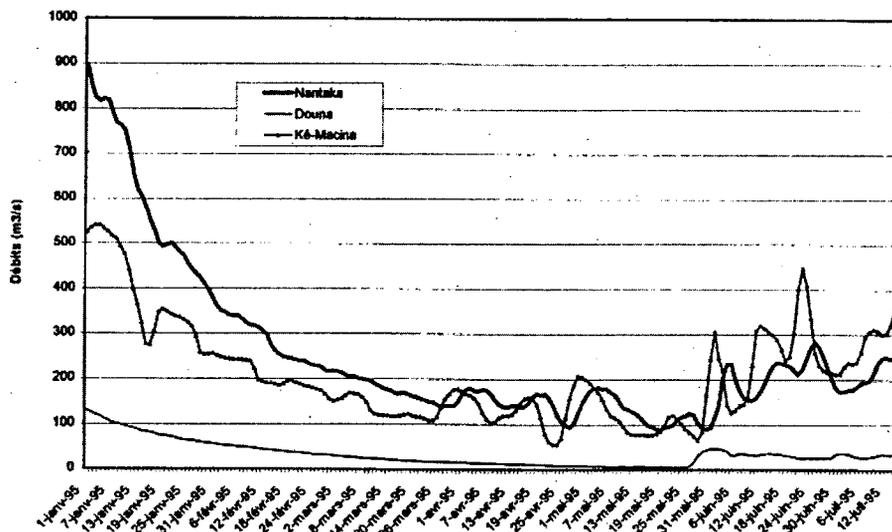


Figure 9. Débits journaliers (en m³/s) en 1995 à Douna, Ké-Macina et Nantaka sous l'influence des barrages de Sélingué et Markala

me de Ké-Macina (scénario «sans Sélingué») à partir du débit observé à Koulikoro, passe par une régression avec une relation mathématique de la forme suivante :

$$QKM_j = b \cdot QK_{j-i}^a \quad (4)$$

QKM_j Débit calculé à Ké-Macina (en m³/s) au jour j,
 QK_{j-i} Débit naturel (reconstitué) de Koulikoro (en m³/s) avec un décalage de i jours, a et b étant des coefficients à déterminer.

L'analyse a été faite sur la période de 1982 à 1997. La régression donne des valeurs différentes pour le décalage i entre les hautes eaux (temps de propagation plus rapide) et les basses eaux :

De janvier à juin :

$$QKM_j = 0,573 QK_{j-4}^{1,0128} \quad (5)$$

(R² = 0,635)

De juillet à décembre :

$$QKM_j = 0,749 QK_{j-2}^{1,0224} \quad (6)$$

(R² = 0,968)

L'équation 6 est satisfaisante avec un coefficient de détermination R² de 0,968. En revanche, il est difficile d'établir une relation

satisfaisante pour l'étiage (équation 5) en raison de l'importance relative des prélèvements de l'Office du Niger à Markala par rapport au débit du fleuve Niger à Koulikoro. Ces prélèvements se font dans une logique de calendrier agricole et des besoins en eau du périmètre irrigué, ce qui explique la difficulté d'établir une relation basée sur la propagation hydrologique. Ainsi, nous avons développé une relation linéaire pour cette période de janvier à juillet entre le débit à Ké-Macina et celui de Koulikoro :

De janvier à juillet

$$QKM_j = 0,6793 QK_{j-4} + 0,1443 \quad (7)$$

(R² = 0,768)

Les équations 6 et 7 permettent la reconstitution de l'hydrogramme de Ké-Macina, proposée en figure 10 pour l'année 1996/1997. On remarque que la courbe reconstituée s'accorde globalement très bien avec les débits observés. Néanmoins, pendant l'étiage il reste quelques problèmes d'accord, liés aux prélèvements de l'Office du Niger. La reconstitution des débits de Ké-

Macina à partir du débit naturel reconstitué de Koulikoro nous a permis de tracer l'hydrogramme ci-dessus (fig. 11).

La comparaison des hydrogrammes reconstitués et observés en 1995 fait apparaître :

- une action réduite du barrage de Sélingué sur la crue, si ce n'est un léger retard dans la crue,
- un étiage totalement soutenu par le réservoir de Sélingué, qui restitue des débits en produisant de l'hydroélectricité.

De ce fait, on peut avancer qu'une gestion rationnelle de Sélingué améliore le régime du fleuve Niger à l'aval. Des perturbations liées au fonctionnement du barrage sont perceptibles, lâchés d'eau et variations des débits turbinés provoquant de nombreuses oscillations pendant l'étiage.

ETIAGE EXCEPTIONNEL DE 1999

La saison hivernale 1998 s'est

achevée dans des conditions hydrologiques plutôt favorables : la crue a atteint un maximum de 5 090 m³/s début octobre à Koulikoro. Le processus de décrue s'est amorcé normalement, le débit à Koulikoro étant toujours de l'ordre de 300 m³/s fin décembre. Cependant, à partir de fin mai, on observe à l'aval de Sélingué une situation hydrologique inhabituelle depuis la construction du barrage de Sélingué en 1982 :

- A Bamako, on observe un assèchement du lit par endroit. A la prise de la station de pompage de Bamako, la hauteur d'eau était de 120 cm le 5 juin.

- A Koulikoro, le 9 juin le bac s'est échoué et le fleuve se traverse à gué.

- A Markala, l'Office du Niger s'inquiète au vu des débits trop élevés qu'ils ont observés de mars à mai ; fin mai la cote en amont du barrage commence à baisser et le 30 mai l'Office du Niger décide de fermer totalement le barrage en vue d'emmagasiner des réserves d'eau. Malgré cette fermeture, le niveau de la retenue a continué de descendre graduellement. En effet, l'Office du Niger n'arrivait plus à atteindre sa cote de consigne, et les exploitants des périmètres irrigués s'inquiétaient. Cette situation est illustrée en figure 12, comparant l'hydrogramme de 1999 à Koulikoro avec les courbes de 1997 et de 1998.

La superposition des hydrogrammes des débits pour les étiages des années successives 1997, 1998 et 1999 montre que :

- Les courbes de 1997 et 1998

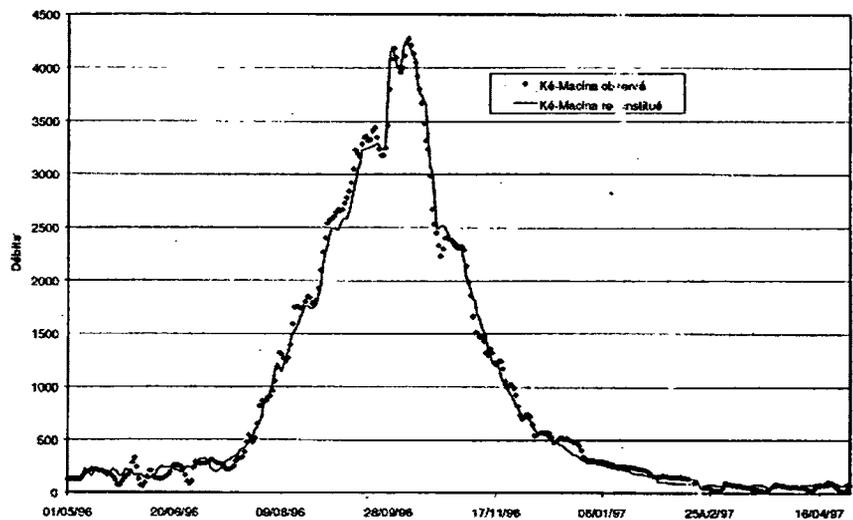


Figure 10. Débits observés et reconstitués (en m³/s) en 1996/1997 à Ké-Macina à partir des équations 6 et 7 (scénario avec Sélingué)

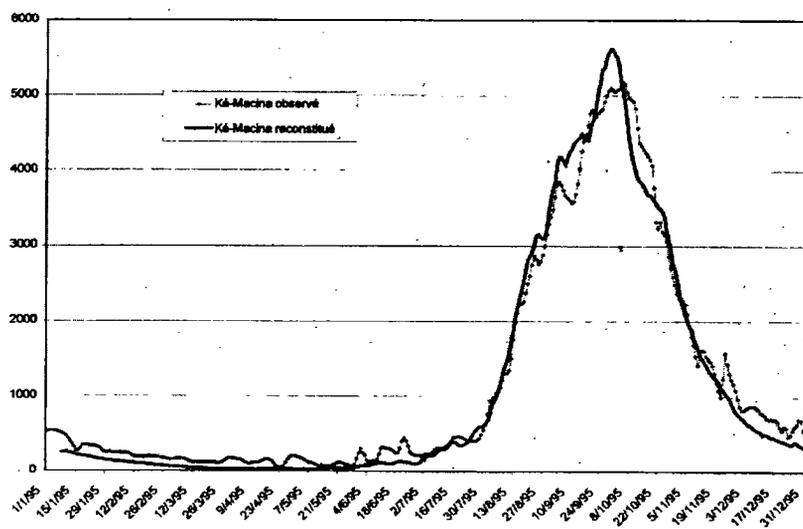


Figure 11. Débits observés et reconstitués (en m³/s) en 1995 à Ké-Macina à partir des équations 2, 3, 6 et 7 (scénario sans Sélingué)

sont assez semblables, leurs allures respectent le comportement classique des hydrogrammes à Koulikoro.

- La courbe de 1999 est largement située au-dessus des deux précédentes en mars-avril avec des variations très brusques et un arrêt brutal des écoulements à partir du 25 mai. La figure 13 montre que Sélingué a commencé à turbiner fortement à partir de mi-mars en s'écartant largement de l'ordinaire avec des débits supérieurs à 200 m³/s. La vidange du réservoir a duré trois mois jusqu'au 20 mai.

- La fermeture du barrage de Markala a été décidée le 30 mai, au moment où l'effet de la chute des écoulements sortant de Sélingué était évident, la propagation de l'onde entre Sélingué et Markala étant estimée à 7 jours.

On remarque que le débit à Koulikoro a chuté fin mai une fois le niveau minimal du réservoir de

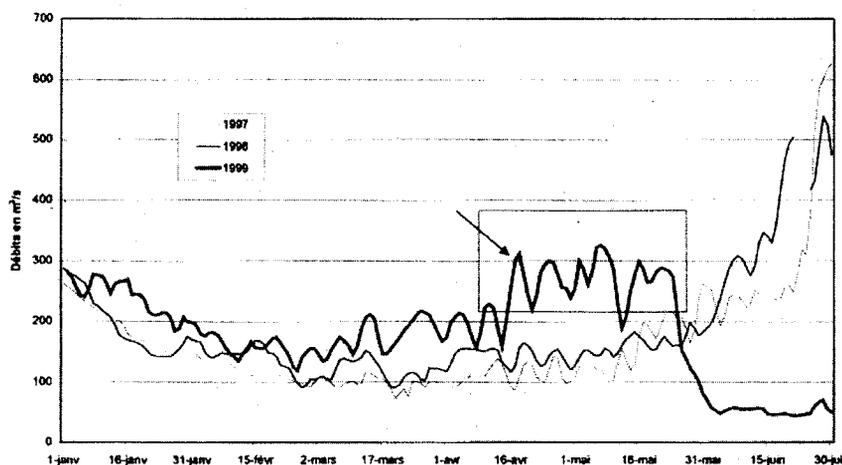


Figure 12. Débits journaliers (en m³/s) à la station de Koulikoro pour les étiages des années successives 1997, 1998 et 1999

Sélingué atteint, en prenant en compte le temps de propagation (estimé à 3 jours en étiage).

La figure 14 montre bien que la pénurie d'eau a également commencé à se manifester à Markala fin mai 1999. Mi-mai, l'Office du Niger a décidé de remplir les falas, les bras morts du fleuve Niger utilisés comme canaux d'alimentation des zones d'irrigation, par mesure de précau-

tion. Cela a nécessité le rehaussement du plan d'eau à plus de 20 cm au-dessus de la cote de consigne (300,30 m selon SOGREA, 1997). A partir de mi-mai on constate une baisse du niveau d'eau en amont du barrage, et le 28 mai le plan d'eau est descendu sous la cote de consigne. Malgré la fermeture totale du barrage, le niveau d'eau a continué de descendre de 3 cm par jour durant tout le mois de juin pour atteindre

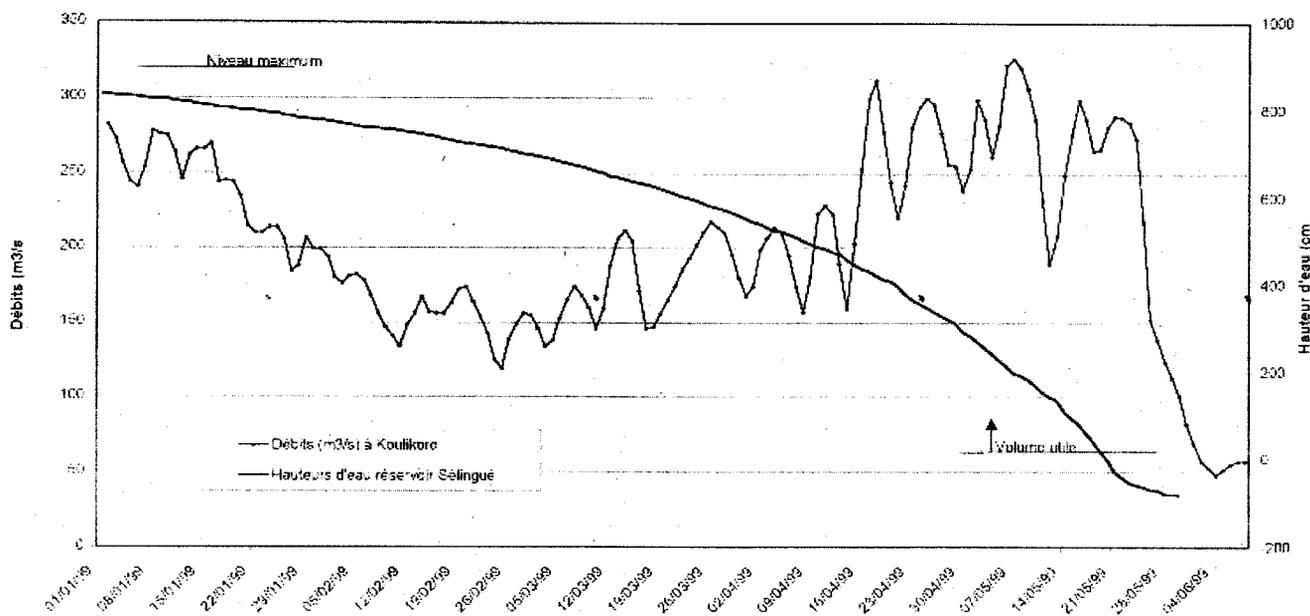


Figure 13. Débits journaliers à la station de Koulikoro en fonction du niveau d'eau du réservoir à Sélingué

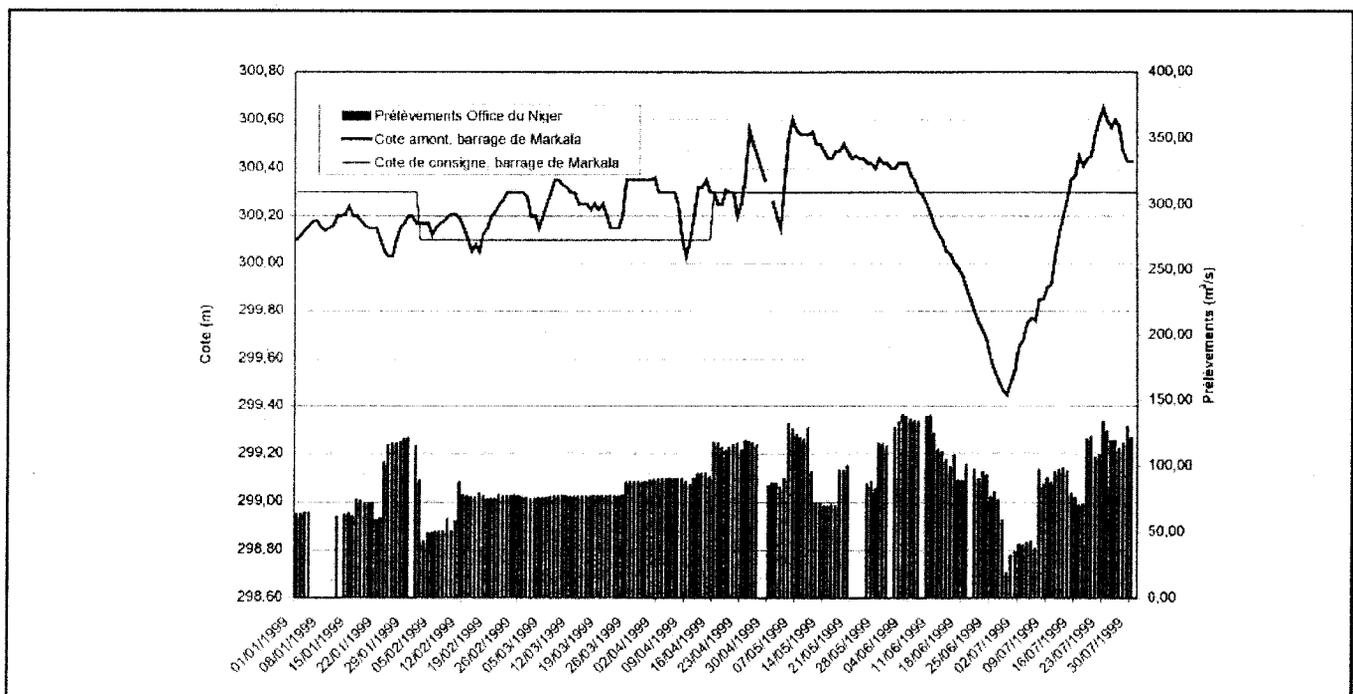


Figure 14. Evolution du plan d'eau amont du barrage de Markala et des débits prélevés par l'Office du Niger (canaux du Sahel, Macina et Costes Ongoïba) en 1999

le minimum de 299,45 m le 29 juin. La tendance s'est ensuite inversée et le niveau d'eau est remonté à raison de 6 cm par jour en moyenne. Le 15 juillet, le plan d'eau se situait à 300,35 m, soit au-dessus de la cote de consigne.

Les conséquences de cette situation ont été les suivantes :

- La cote en amont du barrage de Markala s'est trouvée durant 37 jours (du 8 juin au 14 juillet) en dessous de la cote de consigne.

- La cote devient alors inférieure à la cote nécessaire (300,10 m) pour l'alimentation du canal Costes Ongoïba (5000 ha de canne à sucre, 1500 ha de riz) du 14 juin au 11 juillet, *i.e.* pendant 28 jours.

- En revanche, le volume d'eau en amont du barrage de Markala a permis de continuer à fournir suffisamment d'eau pour la culture de riz dans les zones irrigués par les canaux du Sahel et du Macina pendant cette période de crise. Ensuite, le 30 juin une pluie importante est intervenue dans les zones de

l'Office du Niger, réduisant les besoins en eau du périmètre. En même temps, le débit à Koulikoro a commencé à reprendre à partir de début juillet : le 7 juillet on constate un débit de 110 m³/s, signalant la fin de la période de crise, grâce enfin à une arrivée propice de la saison des pluies. En utilisant l'abaque de la SOGREAH (1992), on peut calculer le potentiel de stockage, qu'a utilisé le gestionnaire du barrage pour continuer à alimenter les canaux du Sahel et Macina, sur les bases suivantes :

- le 26 mai 1999 constitue le premier jour d'écoulement à Koulikoro, contribuant à l'alimentation du plan d'eau après la fermeture du barrage le 30 mai, considérant un temps de propagation de 4 jours. Le débit est de 152 m³/s ;

- à ce jour la cote en amont du barrage de Markala était de 300,42 m ;

- la cote minimum de 299,45 m

an amont du barrage de Markala a été atteint le 29 juin 1999 ;

- le débit à Koulikoro à ce jour était de 55 m³/s.

L'abaque donne alors une différence de volume entre le 26 mai et le 29 juin 1999 de l'ordre de 110 millions de m³, constituant en quelque sorte une réserve d'eau. Le débit moyen à Koulikoro entre le 25 mai et le 29 juin étant de 62 m³/s, le gestionnaire devait ajouter 42 m³/s de la réserve pour parvenir au débit moyen des prélèvements de cette période (104 m³/s). La réserve pourrait dans ce cas lui fournir ce débit pendant 31 jours. Ceci explique la forte diminution du débit prélevé les 29 et 30 juin (*fig. 14*).

Fin juin 1999, les différents acteurs intéressés par le fleuve (administration publique, exploitants et chercheurs) ont été conviés à une réunion sous l'égide du Ministre de l'Environnement, pour discuter de la situation hydrologique exceptionnelle.

Cette réunion a permis d'élaborer un diagnostic et a proposé des mesures à court et à moyen terme. A court terme, il a été retenu de:

- modifier les techniques d'irrigation et le calendrier cultural à l'Office du Niger pour limiter les besoins en eau ;

- arrêter le turbinage du barrage de Sélingué jusqu'au 15 juillet pour permettre le remplissage du réservoir au dessus de la cote minimale de 340 m.

A long terme, il a été décidé de réactiver le comité technique inter-organisme dans le cadre d'une future agence du fleuve Niger et la mise en œuvre d'une politique de communication.

Ces réunions de haut niveau se sont poursuivies et ont aboutit aux recommandations et mesures suivantes :

- création d'un comité de gestion de l'eau du barrage de Sélingué, associant des représentants d'utilisateurs. Ce comité fonctionnera avec une charte, et des outils d'analyse à élaborer, basés sur des considérations techniques et économiques ;

- création d'un comité national, représentatif des forces politiques et économiques, de l'orientation de la politique énergétique. En parallèle, il est décidé de promouvoir des études prospectives sur les besoins énergétiques sur le moyen et long terme ;

- promouvoir l'amélioration des outils de productions d'énergie et d'utilisation de l'eau ;

- mise en œuvre d'une politique de communication sur la situa-

tion du fleuve Niger en direction des usagers du fleuve.

L'étiage exceptionnel de 1999 a bien montré la nécessité d'une gestion intégrée du fleuve Niger. Les gestionnaires des différents aménagements ont géré leurs ouvrages sans tenir compte des besoins des autres utilisateurs et sans informations des actions d'autres intervenants :

- à Sélingué, le barrage a été géré en fonction de la demande électrique sans tenir compte du besoin en eau en aval pour l'ensemble de la période d'étiage;

- à Markala, la gestion du barrage s'est faite à partir de l'observation de l'évolution des hauteurs d'eau locales, sans information sur les écoulements en amont (Banankoro, Sélingué, Koulikoro) ni en aval (Ké-Macina, Nantaka).

CONCLUSION

Les résultats de l'étude montrent :

- un étiage fortement soutenu par le réservoir de Sélingué. L'eau en provenance de Sélingué est utilisée en grande partie (plus de 50 %) par l'Office du Niger et les périmètres de Sélingué et Baguinéda ;

- des perturbations liées au fonctionnement des barrages de Sélingué et Markala sont perceptibles, provoquant de nombreuses oscillations pendant l'étiage à l'entrée du delta (Ké-Macina, Nantaka) ;

- un faible impact des aménagements en période de crue ;

- le barrage de Sélingué ne peut retenir que 7,6 % de l'apport annuel du Niger à Koulikoro ;

- Les prélèvements ne sont pas très importants par rapport à la crue : seulement entre 4 et 18 % de l'apport est prélevé.

Ces résultats nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

1. L'existence du barrage de Sélingué est une bonne chose si les conditions de gestion concertée sont réunies. Le barrage permet de soutenir l'étiage sans pour autant avoir d'impact négatif pendant la période de crue. Cependant, dans la situation actuelle, la gestion du barrage conduit à de nombreuses oscillations de débits pendant l'étiage avec un impact négatif sur la pêche. En plus, il existe maintenant une dépendance des périmètres irrigués en aval de l'eau en provenance de Sélingué. Le cas de l'étiage de 1999 montre qu'une gestion uniquement sur la demande d'électricité, occasionnant une vidange du réservoir de Sélingué à mi-parcours de l'étiage, peut avoir des effets sérieux sur les utilisateurs en aval comme l'Office du Niger.

2. La baisse des superficies inondées dans le delta, accompagnée par une baisse de production de poissons, de pâturage, et de superficie cultivable, dans les années 1980, peut être attribuée aux perturbations climatiques et non aux aménagements sur le Niger supérieur. La reprise de la pluviométrie sur les bassins versants et de la crue depuis 1994, a donné lieu à des augmenta-

tions de la production de pêche et de riz.

3. Actuellement, il n'existe pas de système fonctionnel de prévision des écoulements. Pour cela, il faudra d'abord des outils de modélisation et de prévision, permettant d'établir des relations entre la pluie sur les bassins versants et les hydrogrammes des différentes stations hydrométriques. Il faudra également développer des systèmes de communication pour permettre des échanges d'infor-

mation en temps réel.

4. Il est possible de réduire les effets des aléas climatiques pour les périmètres irrigués situés le long du fleuve, en exploitant les ouvrages existants d'une façon concertée. Il faudrait inclure dans la concertation tous les acteurs du domaine de l'eau afin de rapprocher leurs objectifs et d'améliorer leurs pratiques de gestion. La viabilité des ouvrages existants et en projet en dépend

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bader J.C. 1992. Chaîne de programmes pour la vérification, l'homogénéisation et le complètement des données hydrométriques. ORSTOM-AGRHYMET, Dakar, Sénégal.

Bricquet J. P., Mahé G., Bamba F. et Olivry J. C. 1996. Changements climatiques récents et modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Koulikoro (Mali). IAHS publication no. 238, pp. 157-166.

Boyer J.F., Cochonneau G., Dieulin-Picart C. 1994. HYDROM 3.1, Gestion et traitement de données hydrométriques. ORSTOM, Laboratoire d'hydrologie, Montpellier, France.

Brunet-Moret Y., Chaperon P., Lamagat J.P., Malinier M. 1986. Monographie du Niger. Deux tomes. Orstom, Paris.

DRAMR. 1999. Rapport - Bilan Campagne 1998/1999, région de Mopti, Tombouctou, Mali.

Hassane A. 1999. Influence des aménagements hydrauliques et hydro-agricoles du Niger supérieur sur l'inondation du delta intérieur du Niger (Mali). Mémoire de fin d'études, Ecole Nationale d'Ingénieurs, Bamako, Mali.

HYDROCONSULT. 1996a. Mise à jour de l'hydrologie pour la réhabilitation du barrage de Sélingué. ORSTOM-EDF, Bamako, Mali.

HYDROCONSULT. 1996b. Données d'exploitation du barrage de Sélingué. ORSTOM-EDF, Bamako, Mali.

Kéita N., Kaloga K., et Bélière J.-F. 1999. D'une gestion étatique de l'eau à une gestion paritaire état/usagers : Le cas de l'Office du Niger au Mali. HYDROTOP 99, Marseille, France.

Kuper M., Mullon C., Poncet Y., Orange D. et Morand P. 1999. Modélisation intégrée d'un écosystème inondé et gestion des eaux : le cas du Delta Intérieur du Niger. Séminaire sur les ressources en eau de l'Afrique Occidentale et Centrale, Projets FRIEND/AOC - ZTH, Yaoundé, Cameroun.

LOTTI et SOFRELEC. 1975. Barrage de Sélingué sur le Sankarani, recommandations sur les problèmes de gestion et de fonctionnement. Bamako, Mali.

Mahé G., Bricquet J. P., Soumaguel A., Bamba F., Diabaté M., Henry Des Tureaux T., Kondé C., Leroux J.F., Mahieux A., Olivry J.C., Orange D., et Picquet C. 1997. Bilan hydrologique du Niger à Koulikoro depuis le début du siècle. Acta hydrotechnica 15/18, pp 191 à 200.

Marieu B., F. Bamba, J. Bricquet, N. Cissé, M. Gréard, T. Henry Des Tureaux, G. Mahé, A. Mahieux, J.C. Olivry, D. Orange, C. Picquet, M. Sidibe, M. Touré. 1998. Actualisation des données hydrométriques du fleuve Niger au Mali pour EQUANIS. ORSTOM/DNHE, Bamako, Mali.

Morell M. et J. Grandin. 1981. Etalonnage ouvrages point A, canal du Sahel. Mission Hydrologique ORSTOM, Bamako, Mali.

Olivry J. C., Bricquet J. P., Bamba F. et Diarra M. 1995. Le régime hydrologique du Niger supérieur et le déficit des deux dernières décennies. In : Olivry J.C. et Boulègue J. (eds.), Actes du colloque "Grands bassins fluviaux périatlantiques". Paris, France.

Olivry J.C. 1995. Fonctionnement hydrologique de la cuvette lacustre du Niger et essai de modélisation de l'inondation du delta intérieur. In : Olivry J.C. et Boulègue J. (eds.), Actes du colloque "Grands bassins fluviaux périatlantiques". Paris, France.

Poncet Y. et D. Orange. 1999. L'eau, moteur de ressources partagées : l'exemple du delta intérieur du Niger au Mali. Aménagement et Nature n° 132, pp. 97-108. Paris, France.

SOGREAH. 1992. Barrage de Markala, Consignes générales d'exploitations et d'entretien. Rapport technique. Grenoble, France.

SOGREAH. 1997. Barrage de Markala, Consignes générales d'exploitations et d'entretien. Rapport technique. Grenoble France.

Soumaguel A. 1995. Influence du barrage de Sélingué sur le Régime Hydrologique du Niger. Mémoire de fin d'études présenté au Centre AGRHYMET, Niamey, Niger.