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 km^2 en période humide à 7 000 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 caracterized 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 km^2 in wet period and 7 000 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 km² suivant un rectangle orienté SW.NE de 450 km de longueur sur 125 km de largeur (Fig. 1).

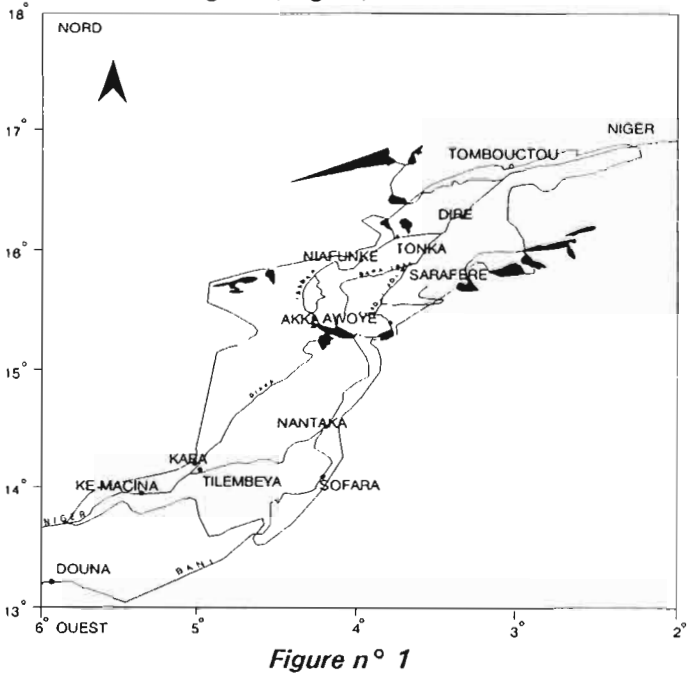


Figure n° 1

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.

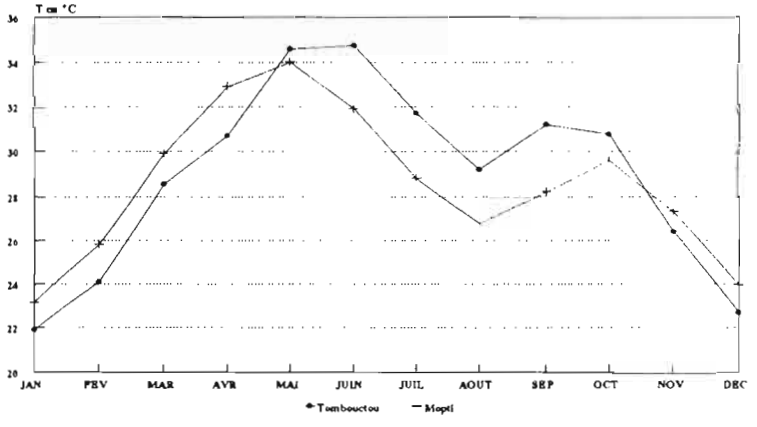


Figure n° 2

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

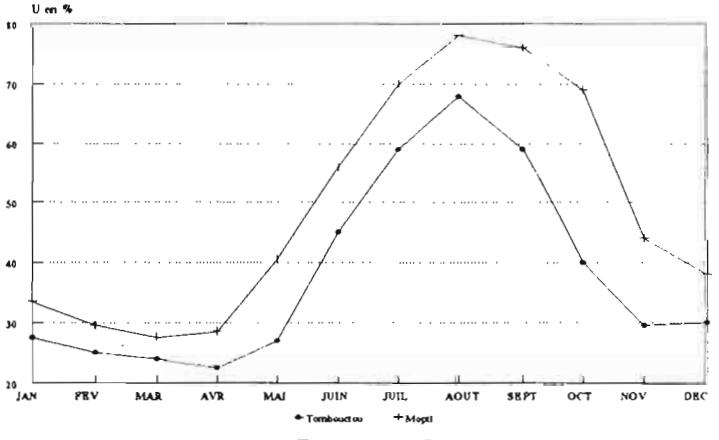


Figure n° 3

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

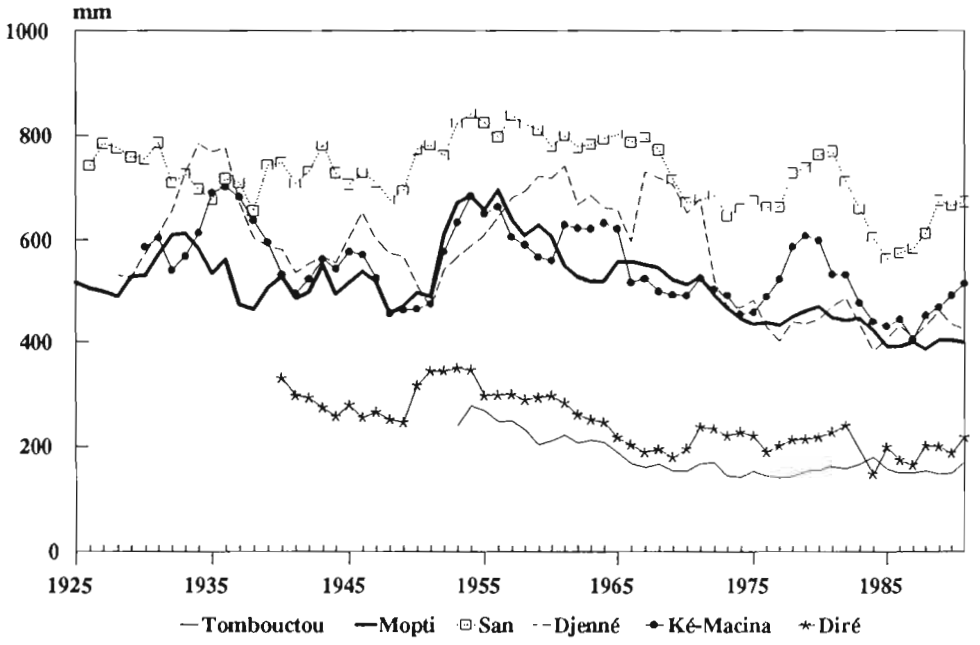


Figure n° 4

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, défluents 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 Niafounké mais tombe à 1 cm km^{-1} de Niafounké 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 ($m^3.s^{-1}$).

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 km^3 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 $m^3 s^{-1}$. Le maximum de crue médian (Q_{MAX}) a été évalué à 5600 $m^3 s^{-1}$ pour Ké-Macina, 1600 $m^3 s^{-1}$ pour le Diaka à Kara, 3300 $m^3 s^{-1}$ pour le Niger à Mopti et 2300 $m^3 s^{-1}$ 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.

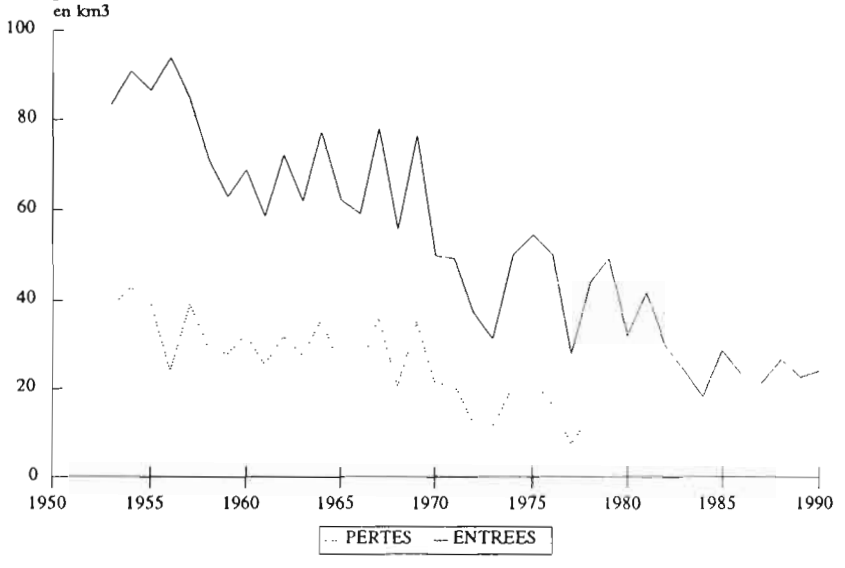


Figure n°5

Evolution des volumes des apports annuels du bassin supérieur en milliards de m^3 (km^3) 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 km^3. 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).

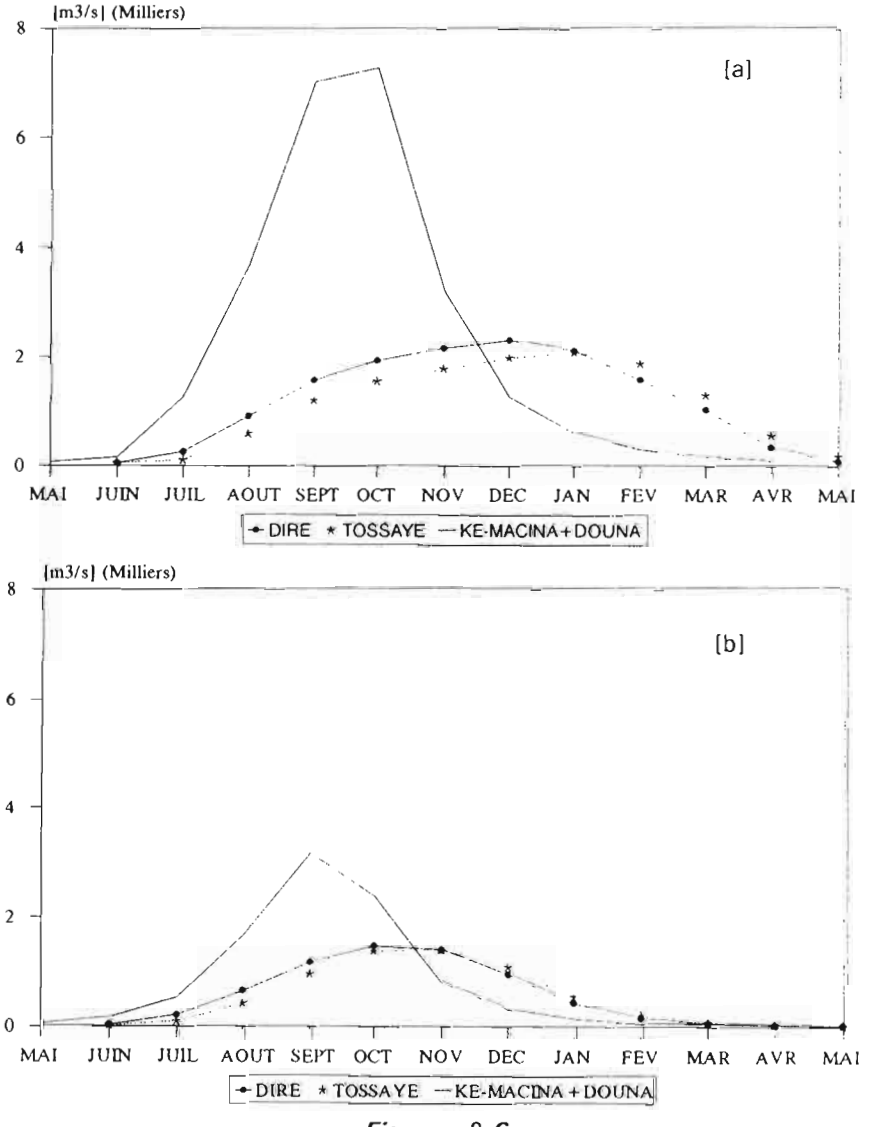


Figure n° 6

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 km^3 entre les entrées et Diré pour la période humide, à 7 km^3 pour la période sèche soit un rapport de 4,14. Entre

Diré et Tossaye, les pertes sont beaucoup plus réduites : près de 3 km^3 en période humide, 1 km^3 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 km^3 au mois d'octobre) et en septembre pour les années sèches, avec un peu moins de 5 km^3 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 km^3. La restitution est plus précoce mais beaucoup plus faible en années sèches : autour de 1 km^3 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).

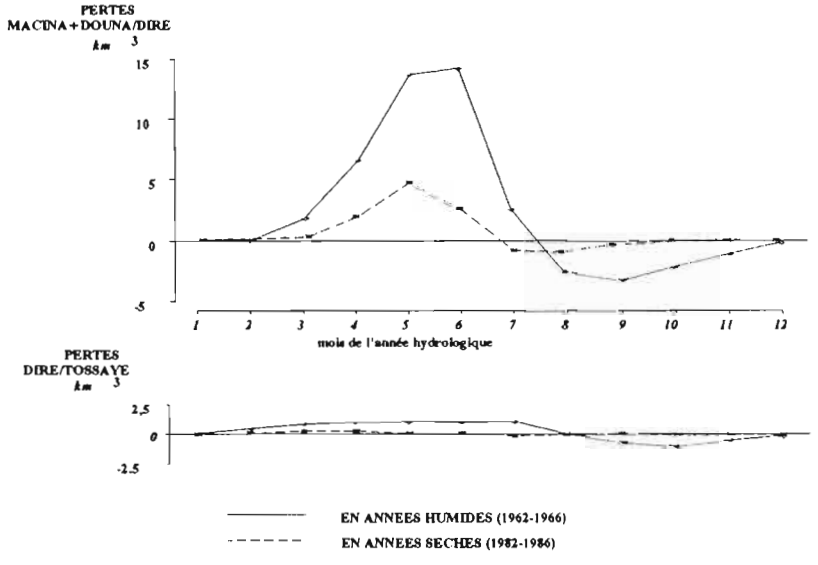


Figure n° 7

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 m^3 (km^3). 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).

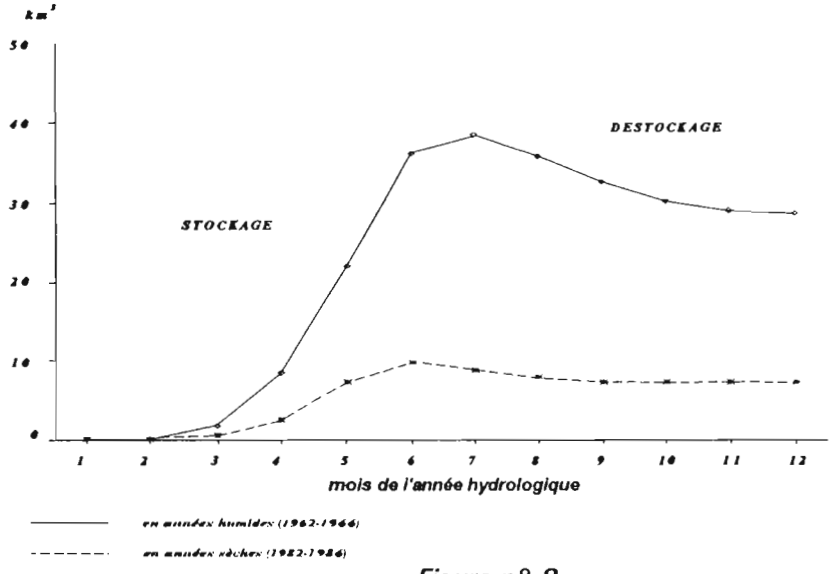


Figure n° 8

Courbes cumulées moyennes des pertes mensuelles à Diré en km³ pour les périodes humides (1962 - 1966) et sèches (1982 - 1986).

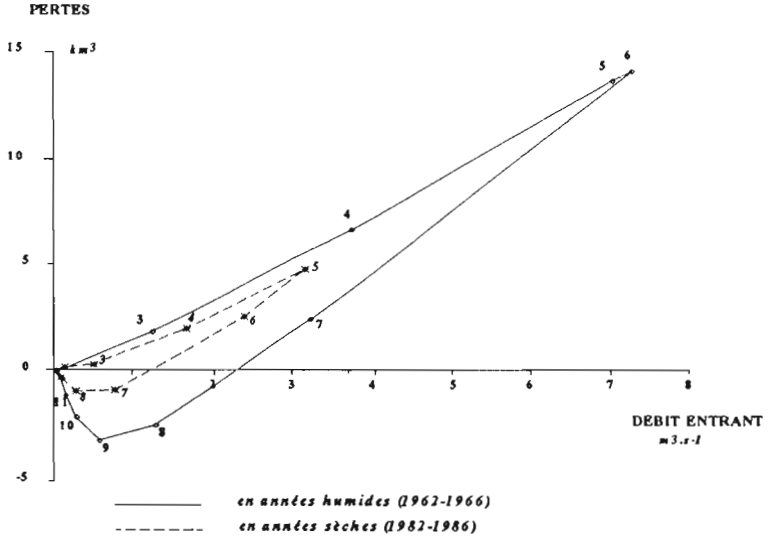


Figure n° 9

Relations entre les pertes moyennes mensuelles observées à Diré (km³) et les débits entrés de Ké-Macina et Douna 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, Niafounké, 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 :

PERTES (ΔV) = DEBIT AMONT (Vm) - DEBIT AVAL (Vv)
PERTES (ΔV) =(EVAPORATION (E) + INFILTRATION (I) + STOCKAGE (inondation) (St))
- (PRECIPITATIONS (P) + AUTRES APPORTS RUISSELES (r) + RESTITUTION (Rs))

Trois périodes principales :

1°) montée des eaux — Pertes positives = E + I + St - P - r - Rs
r et Rs négligeables
= E + I + St - P
St est le terme principal

2°) maximum de la crue — Pertes = E + I + St - Rs
étale de l'inondation St = Rs
PERTES # EVAPORATION

3°) décrue — Pertes négatives = E + I - Rs

BILAN ANNUEL
Pertes = E + I + dSt - P
par hypothèse I = P , sauf pour années très humides, dSt est négligeable

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**
($Vm_{(n)}$ - $Vv_{(n+1)}$) et la date d'apparition du maximum à Mopti permettent de déterminer la perte mensuelle, centrée sur l'instant tmax, due à l'évaporation et d'estimer la surface maximale d'inondation correspondante (S) (S = ℘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.

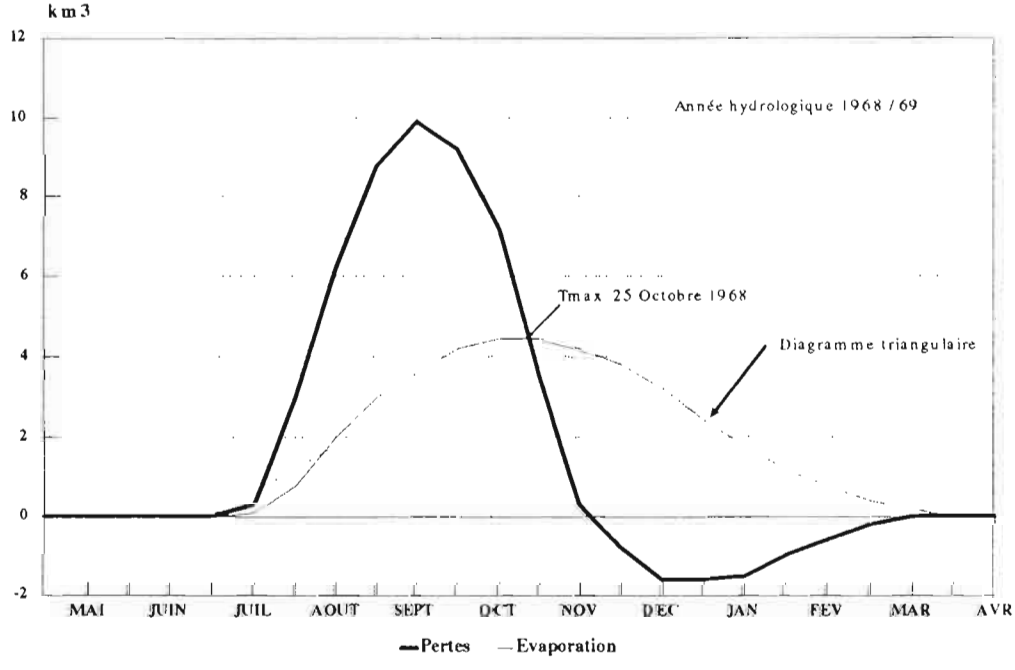


Figure n° 10

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.

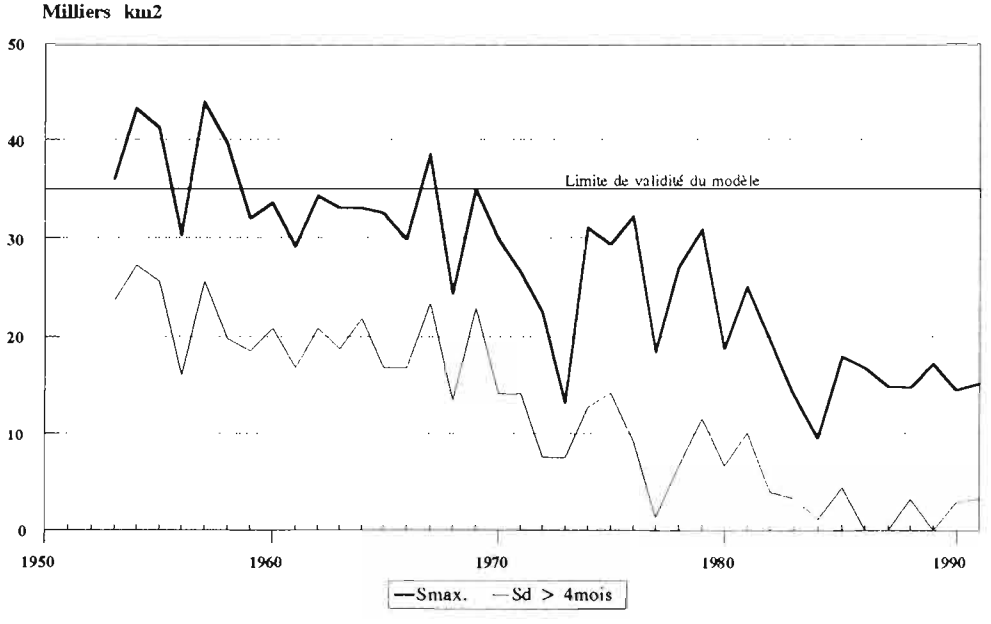
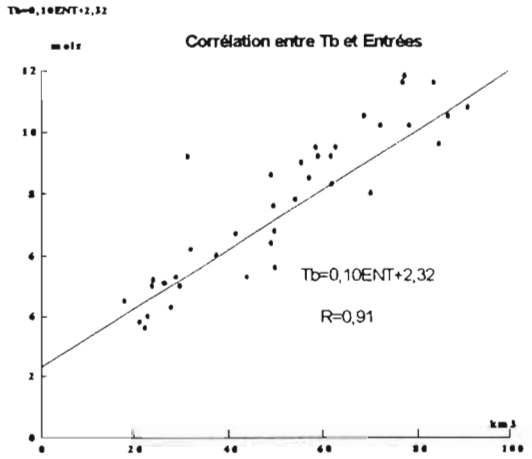
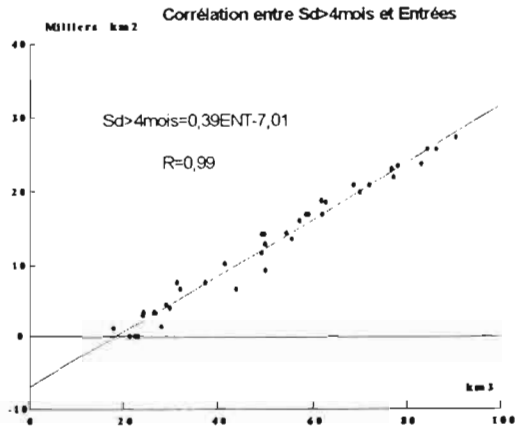


Figure n° 11

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





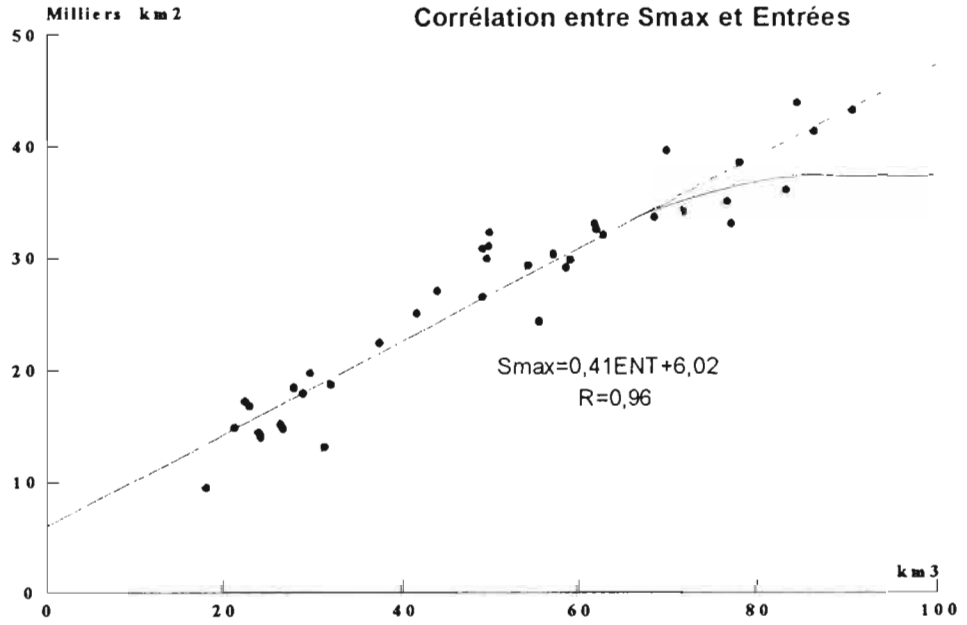


Figure n°12

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 Smax = f(ENT), f(Apports Cumulés Max Crue), f(Pertes), f(H Max), tB = f(ENT) et Sd = f(ENT).

	Variable x					Variable y		
Années	ENT km^3	Apports cumulés Maxi Crue	Pertes km^3	Hmax,cm Mopti	Date tmax	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 hydraulicité 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 hydraulicité, 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 tmax. Le temps de base (t_B) de ce diagramme est alors défini en mois par l'équation :

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

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 $S_i \geq 21\ 500$ km² pendant $t_i = 5{,}4$ mois (160 j)
- pour 1968 $S_i \geq 12\ 000$ km² pendant $t_i = 4{,}5$ mois (135 j)
- pour 1985 $S_i \geq 9\ 000$ 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 :

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

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.

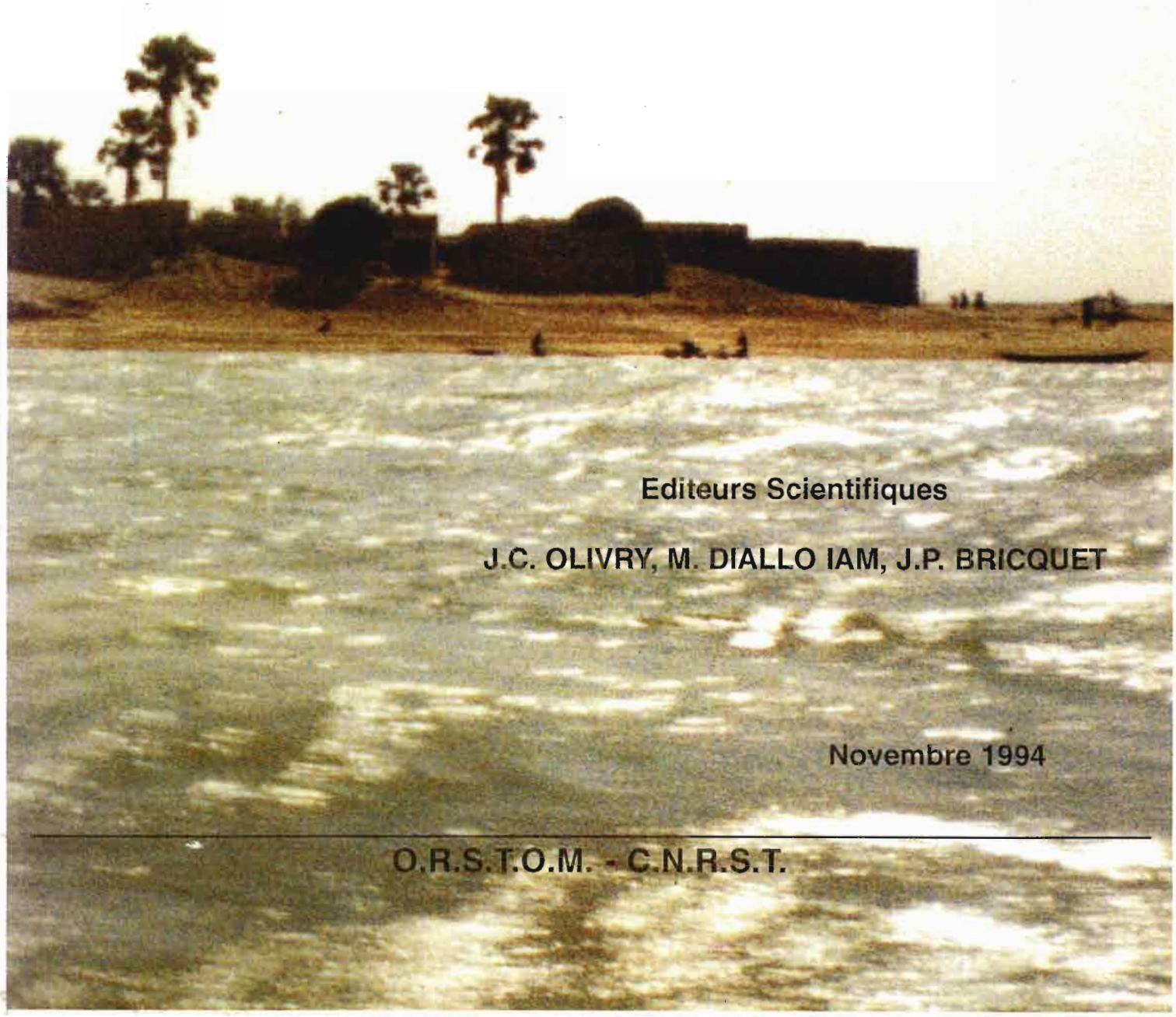
LAE R. (1992) Impact des barrages sur les pêcheries artisanales du delta central du Niger. Cahiers Agricultures, Vol. 1992.2, Paris, pp. 14 - 21.

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

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