

Courbe de remous du barrage de Diama sur le Sénégal

Modèle de prévision des cotes aux stations influencées par la retenue

Jean-Claude BADER (1)

RÉSUMÉ

La courbe de remous du barrage anti-sel de Diama, implanté sur le fleuve Sénégal, est déterminée en utilisant conjointement la méthode de SILBER, concernant le calcul des courbes de remous en régime permanent, et le modèle de propagation de crue de LAMAGAT. L'ensemble permet de faire une prévision de cote pour plusieurs stations situées dans le remous, à partir de la cote relevée à une station non influencée, située à l'amont, et de la cote dans la retenue. Bien que les horizons de prévision soient assez élevés (jusqu'à 18 jours à partir de l'amont, et 9 jours à partir de la retenue), la comparaison des prévisions obtenues avec les cotes observées en 1988 et 1989, montre une précision acceptable de l'ordre de 10 cm. Dans la mesure où elle peut s'appuyer sur un nombre suffisant de stations, dont la plus en aval doit être suffisamment proche de la retenue, la méthode présente l'intérêt d'utiliser des paramètres calés sur les données du seul régime naturel.

MOTS CLÉS : Fleuve Sénégal — Barrage de Diama — Courbe de remous — Propagation de crue — Prévision de cote — Pas de temps journalier.

ABSTRACT

BACKWATER CURVE OF THE DIAMA BARRAGE ON THE SENEGAL : MODEL FOR FORECASTING LEVELS AT STATIONS INFLUENCED BY THE STORAGE

The backwater curve of the anti-salinity barrage of Diama, sited on the river Senegal is determined using both the SILBER method of calculating backwater curves in a permanent regime, and the LAMAGAT model of flood propagation. The combination permits a forecast of level for sites in the backwater based on level at one station above the influence, and the level in the reservoir. Given that the forecast horizons are high (up to 18 days in terms of upstream levels, and 9 days in terms of reservoir level), the comparisons of forecast and measured levels in 1988 and 1989 show an acceptable precision of the order of 10 cm. When it can be based on sufficient stations with the lowest sufficiently close to the reservoir, the method can use parameters based on the natural regime above.

KEY WORDS : River Senegal — Diama barrage — Backwater curve — Flood propagation — Level forecast — Daily time step.

1. INTRODUCTION

Le bassin du fleuve Sénégal (fig. 1) est équipé de deux barrages importants, gérés par l'OMVS (Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal), organisme inter-état regroupant le Mali, la Mauritanie et le Sénégal. Celui de Diama, implanté très près de l'embouchure et mis en service en 1986, est destiné à empêcher l'intrusion de la langue salée marine, et permet en outre de rehausser le niveau du fleuve, favorisant ainsi l'irrigation. Celui de

(1) *Hydrologue Orstom, BP 1386, Dakar, Sénégal.*

Manantali, implanté sur la rivière Bafing qui fournit environ la moitié des volumes transitant dans le fleuve, a été mis en service en 1988. Cet ouvrage, pouvant retenir jusqu'à 12 milliards de mètres cube d'eau, est destiné à la fois à produire de l'électricité, et à régulariser le fleuve pour des objectifs multiples : fourniture de débit pour l'irrigation, soutien d'étiage pour la navigation, laminage des fortes crues, soutien des faibles crues pour l'optimisation des cultures traditionnelles.

Un modèle de propagation de crues mis au point par l'Orstom (LAMAGAT, 1989-b), utilisant les données de hauteurs d'eau télétransmises en temps quasi réel depuis 9 limnigraphes répartis sur le bassin du Sénégal (fig. 1), permet d'ajuster les lâchures effectuées au barrage de Manantali, en fonction des demandes de débit exprimées dans la vallée, à partir de Bakel et en aval (SEGUIS, 1991). Ce modèle a été calé sur un certain nombre de tronçons du fleuve, à partir des données limnimétriques relatives au régime naturel, très proche du type tropical pur (RODIER, 1964). On constate à partir des données de 1988 et 1989, qu'il reste valable pour le régime du fleuve modifié artificiellement par le barrage de Manantali, à l'exception de la basse vallée du Sénégal, où les niveaux sont directement influencés par le barrage de Diama. Il était donc nécessaire de développer un modèle spécifique de prévision de cote pour cette partie du fleuve, qui traverse une zone d'intense activité agricole (cultures irriguées ou de décrue), où la connaissance des niveaux d'eau dans le fleuve, ainsi que leur prévision, est de la plus grande importance.

Une méthode de calcul combinant le modèle de propagation de LAMAGAT, avec la méthode de SILBER (1968) pour le calcul des courbes de remous en régime permanent, permet de connaître les cotes à un certain nombre de stations influencées, à partir de la cote dans le lac de Diama et des conditions de cote ou de débit à une station non influencée de l'amont. La suite du texte présente le principe général de cette méthode, suivi du détail de la procédure de calcul, et des données utilisées. La validité du modèle est enfin testée par comparaison entre limnigrammes reconstitués et observés.

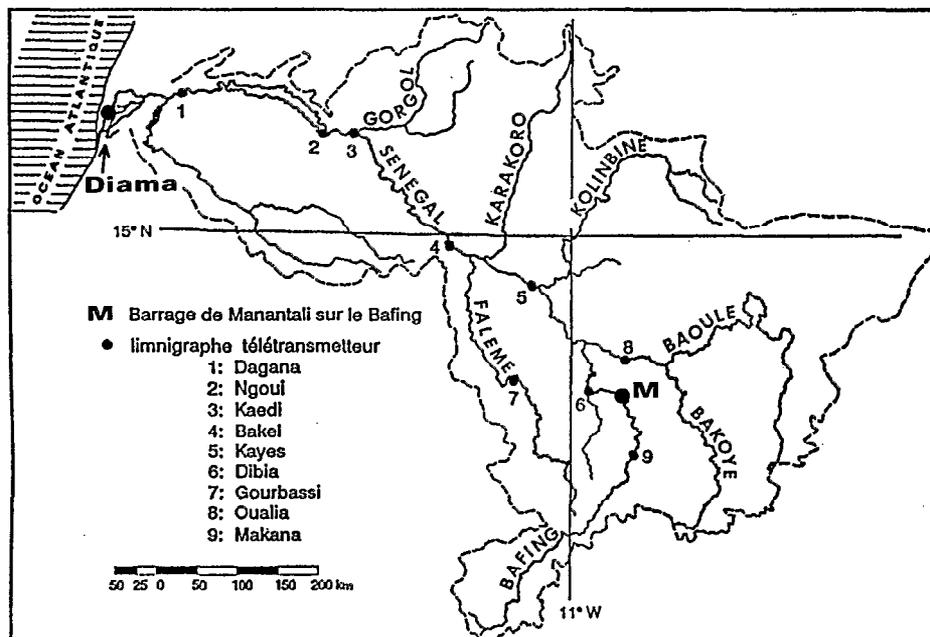


FIG. 1. — Carte du bassin du Sénégal.

2. PRINCIPE GÉNÉRAL DE LA MÉTHODE

2.1. ASPECTS PHYSIQUES DU PROBLÈME

Le cours inférieur du Sénégal qui nous intéresse est constitué de plusieurs chenaux communiquant entre eux (fig. 2), formant le lit mineur du fleuve. Ces chenaux entaillent de vastes plaines inondables, sur lesquelles peuvent transiter, sur certaines sections, une fraction importante des débits de hautes eaux (ROCHETTE, 1974). Sur cette partie

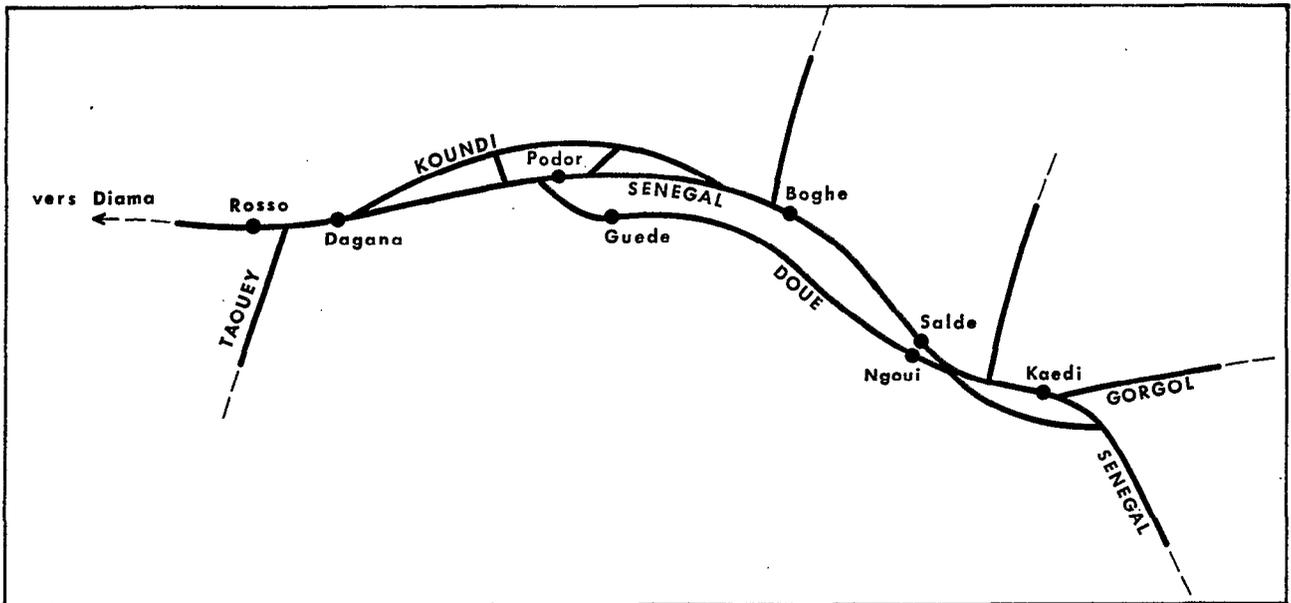


FIG. 2. — Schéma très simplifié de la situation des principaux chenaux et des stations retenues.

du fleuve qui ne reçoit que des apports négligeables, le régime naturel d'écoulement est caractérisé par la propagation d'une crue annuelle, qui s'amortit vers l'aval. L'analogie évidente entre limnigrammes observés à des stations successives (fig. 3), permet d'envisager l'existence d'une relation quasi-fonctionnelle entre la cote relevée à une station, et les cotes antérieures apparues à une station située à l'amont. Pour les stations les plus en aval (Rosso, Dagana), les cotes de basses eaux subissent l'influence de la relation précédente, à laquelle s'ajoute une fluctuation périodique (de période 15 jours), due probablement à l'effet de la marée.

Dans le cas du régime contrôlé par les barrages de Diama et Manantali, la figure 4 montre que la relation entre limnigrammes de stations successives reste très étroite sur l'ensemble du marnage pour la partie amont du cours inférieur du fleuve (Kaédi, Salde). Pour la partie aval, elle subsiste en hautes eaux mais semble disparaître totalement en basses eaux, au profit d'une liaison étroite entre cote relevée à la station, et cote relevée au barrage de Diama. Le modèle de prévision à mettre au point pour cette partie du fleuve doit donc représenter la cote à partir de deux informations d'importance variable. La première est le limnigramme relevé à une station de l'amont, non influencée

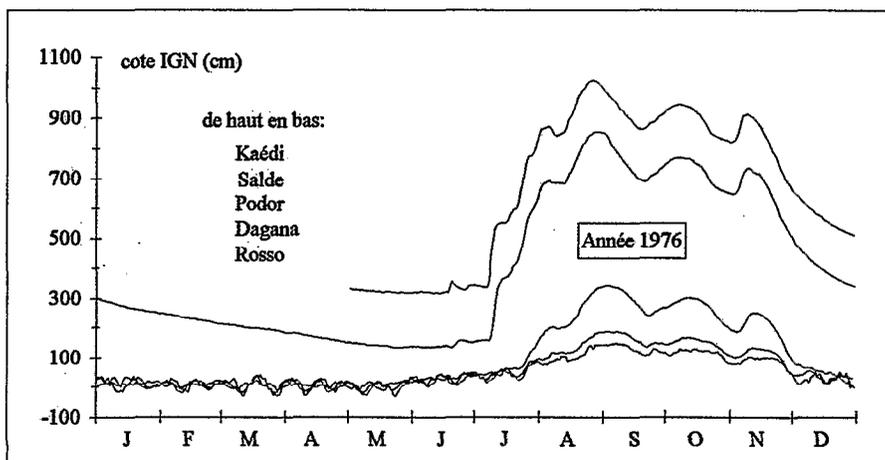


FIG. 3. — Exemple de limnigrammes observés à l'aval de Kaédi, avant l'existence du barrage de Diama.

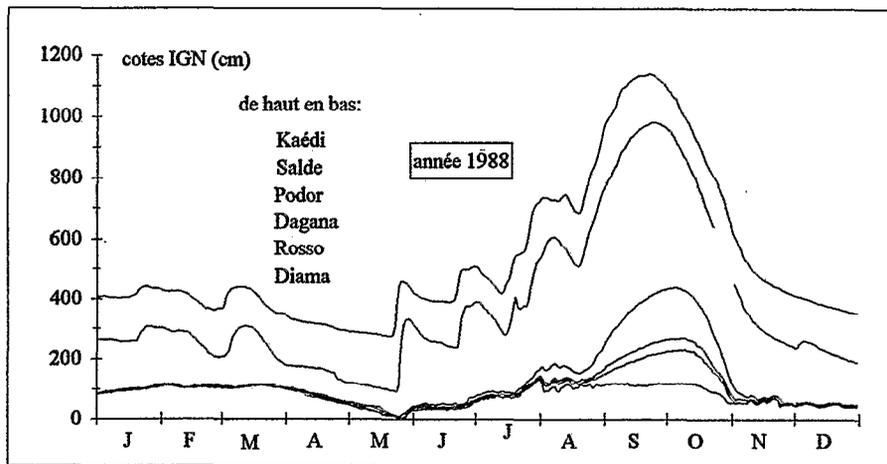


FIG. 4. — Exemple de limnigrammes observés à l'aval de Kaédi, après l'érection du barrage de Diama.

par le barrage de Diama (en pratique, on retiendra soit celle de Bakel, soit celle de Kaédi, qui sont toutes deux équipées de limnigraphes télétransmetteurs). La seconde information est le limnigramme relevé au barrage de Diama.

Les données disponibles au début de l'étude, relatives au régime influencé par la retenue, allaient de 1988 à début 1990. Sur cette période, hormis début 1988, le niveau du lac de Diama est assez fortement corrélé avec la cote à la station de Bakel. Ceci, ajouté à la taille relativement réduite des échantillons, constituait une condition défavorable à l'utilisation d'une méthode purement statistique (corrélation double) pour déterminer les cotes dans la zone influencée par le barrage. C'est pourquoi on a préféré utiliser une combinaison du modèle de propagation de crue de LAMAGAT, avec la méthode de calcul des courbes de remous de SILBER.

2.2. PRISE EN COMPTE DE L'INFORMATION AMONT. MODÈLE DE PROPAGATION DE LAMAGAT

Il s'agit d'un modèle corrélatif de transfert des ondes de crue, que l'on peut utiliser soit en débit, soit en cote. En débit, il consiste à établir la relation permettant de passer du débit Q_{amont} d'une station à un instant t , au débit Q_{aval} qui en résulte à une station située à l'aval, au temps $t + \Delta t$. Pour déterminer les relations $Q_{\text{aval}}(Q_{\text{amont}})$ et $\Delta t(Q_{\text{amont}})$, on calcule à partir des données observées, par tranches de valeurs de Q_{amont} et pour différentes valeurs de Δt , les régressions linéaires entre $Q_{\text{amont}}(t)$ et $Q_{\text{aval}}(t + \Delta t)$. Pour chaque tranche, on retient la valeur moyenne de Q_{amont} , la valeur de Δt qui donne le meilleur coefficient de corrélation, et la valeur correspondante de Q_{aval} donnée par la régression retenue. Les relations ainsi établies de façon statistique entre débits de stations successives, prennent en compte à la fois l'amortissement moyen des ondes de crues du régime naturel et, dans le cas d'un écoulement non filaire comme celui qui nous intéresse, la répartition des débits dans les différents bras du fleuve.

2.3. PRISE EN COMPTE DE L'INFORMATION AVAL. CALCUL DES COURBES DE REMOUS PAR LA MÉTHODE DE SILBER

La méthode proposée par SILBER pour le calcul des courbes de remous dans les cours d'eau naturels a été préférée à d'autres méthodes classiques, parce qu'elle offre l'avantage de ne faire intervenir aucun coefficient de rugosité, que la complexité des écoulements dans la basse vallée rend difficile à évaluer.

Pour un écoulement filaire en régime permanent, elle consiste à utiliser les relations hauteur — débit du régime naturel, connues en un certain nombre de stations, pour déterminer les cotes obtenues à ces stations en régime influencé, pour une valeur donnée de débit. Pour cela, on démarre le calcul avec la station la plus en aval, qui doit être située le plus près possible de l'ouvrage dont on veut calculer le remous, de façon que la cote influencée puisse y être assimilée à celle du plan d'eau de l'ouvrage. Pour une cote donnée à cette station, on écrit, pour le régime naturel et pour le régime influencé, la relation de Bernoulli traduisant la perte de charge subie par l'écoulement depuis la station précédente située en amont. La juxtaposition des deux équations permet alors de déterminer en

régime influencé, pour la condition de débit retenue, la charge et la cote à la station amont. On réitère ensuite le calcul entre cette station et la suivante, et ainsi de suite.

Telle que proposée par SILBER, la méthode fait intervenir des variables adimensionnelles qui permettent, par l'utilisation d'un papier fonctionnel dit « diagramme universel des écoulements à surface libre », d'éviter un certain nombre de calculs numériques. Les moyens de calculs disponibles aujourd'hui nous permettent d'éviter ces artifices, en travaillant directement sur les variables naturelles.

2.4. COMBINAISON DES DEUX MÉTHODES. ADAPTATION AU REMOUS DU BARRAGE DE DIAMA

Les stations situées *a priori* dans le remous de Diama, pour lesquelles on dispose de mesures de débit suffisantes en régime naturel, sont indiquées sur la figure 2. Moyennant certaines adaptations, la méthode de SILBER peut être appliquée le long des deux parcours suivants, où l'on indique pour chaque station la valeur de PK, distance kilométrique mesurée le long du chenal depuis la ville de Saint-Louis, proche de l'embouchure du fleuve.

— branche Sénégal : Rosso (PK 133), Dagana (PK 169), Podor (PK 267), Boghe (PK 379), Salde (PK 474), Kaédi (PK 532) ;

— branche Doué : Rosso, Dagana, Guede (PK 305), Ngoui (PK 461), Kaédi.

Les adaptations nécessaires concernent les points suivants.

2.4.1. Détermination de la cote à la station la plus en aval, en régime influencé

Rosso, la station la plus en aval, est située 105 km à l'amont du barrage de Diama (PK 28). Cette distance importante nous empêche d'assimiler la cote à cette station, à celle qui, relevée au droit de l'ouvrage, constitue une des deux entrées de notre modèle. En préalable aux autres calculs, on est donc forcé de recourir à un calcul corrélatif, calé sur les données du régime influencé, pour déterminer la cote à Rosso à partir de la cote simultanée à Diama, et d'une cote relevée antérieurement à Kaédi ou Bakel. Il s'agit en fait d'une adaptation du modèle de propagation de LAMAGAT. Alors qu'en régime naturel, celui-ci fait correspondre à une cote relevée à Bakel ou Kaédi, une cote et un temps de propagation pour Rosso, en régime influencé, il fait correspondre avec le même temps de propagation, la différence de cote entre Rosso et Diama.

2.4.2. Correspondance des débits entre stations successives

La méthode de SILBER, établie pour le cas d'un écoulement filaire en régime permanent, suppose l'égalité du débit sur l'ensemble des stations retenues, et ne fait intervenir aucune notion de temps. Ces conditions ne conviennent pas à la basse vallée du Sénégal, où l'écoulement se fait dans plusieurs chenaux, et où le régime naturel ne présente une permanence de débit suffisante qu'en basses eaux, quand le débit varie peu à Kaédi pendant un temps supérieur au temps de propagation entre Kaédi et Rosso.

La relation de Bernoulli qui est à la base de la méthode de SILBER, relie la perte de charge (énergie par unité de poids) de l'écoulement entre deux stations, au travail par unité de poids des forces de viscosité. Elle est obtenue en intégrant le théorème de l'énergie cinétique le long d'un filet liquide, en suivant en quelque sorte la trajectoire d'une particule, et rien n'empêche de l'appliquer sur un écoulement non filaire.

Par ailleurs, le résultat de cette intégration effectuée sur une distance infinitésimale dans le cas d'un écoulement non permanent, diffère de celui du régime permanent, par la présence d'un terme $(1/g) \cdot (\partial V / \partial t) \cdot ds$, où g désigne l'accélération de la pesanteur, V la vitesse, t le temps et s l'abscisse dirigée dans le sens de l'écoulement. Nous supposons donc les variations de vitesse suffisamment lentes dans le temps, pour pouvoir négliger ce terme devant celui du travail des forces de viscosité par unité de poids, et appliquer le théorème de Bernoulli en régime non permanent. Nous prendrons également le parti de relier la perte de charge entre deux stations, au débit passant à la station aval.

Ces différentes approximations, qui seront justifiées plus loin par la bonne qualité des cotes modélisées, permettent de mener comme suit le calcul de la courbe de remous pour une cote donnée à la station entrée de l'amont (Bakel ou Kaédi) :

— pour la station entrée de l'amont, l'étalonnage en régime naturel permet de calculer le débit correspondant à la cote retenue ;

— le modèle de LAMAGAT, calé en régime naturel, permet de définir à partir du débit de la station entrée de l'amont, les débits résultants aux différentes stations, ainsi que les temps de propagation correspondants ;

— en faisant l'hypothèse que l'influence du barrage de Diama ne modifie pas de façon importante la propagation des débits, ceux qui sont calculés ci-dessus sont utilisés pour appliquer la méthode de SILBER. Les calculs sont menés à partir de la cote déterminée plus haut pour la station de Rosso, en remontant à la fois le sens de l'écoulement et le temps.

3. DÉTAIL DE LA PROCÉDURE

3.1. MÉTHODE DE SILBER POUR LE RÉGIME PERMANENT

On adopte les notations suivantes :

z	(m)	: cote IGN de la surface libre
Q	($m^3.s^{-1}$)	: débit
g	($m.s^{-2}$)	: accélération de la pesanteur
S	(m^2)	: section mouillée
J		: perte de charge linéaire
H	(m)	: charge hydraulique
C	($m^{0.5}.s^{-1}$)	: coefficient de Chezy
R	(m)	: rayon hydraulique
x	(m)	: abscisse le long de l'écoulement, comptée positivement vers l'amont
d		: désigne une différentielle

L'expression de la charge hydraulique, qui se réfère dans tout ce qui suit au plan horizontal de cote 0 m IGN, est :

$$H = z + Q^2/(2.g.S^2) \quad (0)$$

D'après SILBER, la perte de charge linéaire est donnée par la somme de deux termes correspondant respectivement aux pertes de charge par frottement (J1), et par divergence (J2). Le premier peut être exprimé à partir de la formule de CHEZY, appliquée en première approximation aux écoulements permanents graduellement variés.

$$J = dH/dx = J1 + J2$$

$$J1 = Q^2/(C^2.S^2.R)$$

Du fait que C et R sont des fonctions de S, on peut exprimer J1 sous la forme :

$$J1 = Q^2/f(S)$$

Le terme J2 s'exprime en fonction de la variation linéaire de vitesse moyenne le long de l'écoulement. Il est nul dans le cas où la vitesse diminue de l'aval vers l'amont (écoulement convergent), et positif dans le cas contraire (écoulement divergent).

$$J2 = \max(0, k.d(Q^2/(2.g.S^2))/dx)$$

avec k, constante prise généralement égale à 0,5.

La méthode consiste ensuite à discrétiser les expressions précédentes, en considérant des variations non plus sur une distance infinitésimale dx, mais sur une distance finie Dx séparant deux stations successives, auxquelles nous affecterons par la suite les indices i et i+1. On obtient alors :

$$H_{i+1} - H_i = J.Dx = Dx. \frac{Q_i^2}{f_i(S_i)} + k.\max(0, (Q_{i+1}/S_{i+1})^2 - (Q_i/S_i)^2)/(2.g) \quad (1)$$

Considérons que les équations écrites jusqu'à présent soient relatives au régime influencé par la retenue érigée à l'aval. On peut écrire les mêmes équations pour le régime naturel, en affectant les variables d'un indice prime :

$$H'_{i+1} - H'_i = Dx. \frac{Q_i'^2}{f_i(S'_i)} + k.\max(0, (Q'_{i+1}/S'_{i+1})^2 - (Q'_i/S'_i)^2)/(2.g) \quad (2)$$

Etant donné z_i , la cote obtenue à la station i pour un débit Q_i avec influence du barrage, on considère le débit Q'_i qui, dans le régime naturel, donne la même cote :

	cote	section	débit	
régime influencé :	z_i	S_i	Q_i	
régime naturel :	z'_i	S'_i	Q'_i	
		$z'_i = z_i$	$\implies S'_i = S_i$	(3)

$$(1) \quad (2) \quad (3) \quad \implies \quad H_{i+1} = H_i + D1_i + D2_i \quad (4)$$

avec :

$$D1_i = (H'_{i+1} - H'_i) \cdot (Q_i/Q'_i)^2 \quad (5)$$

$$D2_i = k \cdot (\max(0, (Q_{i+1}/S_{i-1})^2 - (Q_i/S_i)^2) - (Q_i/Q'_i)^2 \cdot \max(0, (Q'_{i+1}/S'_{i+1})^2 - (Q'_i/S'_i)^2)) / (2 \cdot g) \quad (6)$$

On suppose que sont connus :

— la relation donnant la section mouillée en fonction de la cote, pour chacune des stations :

$$S_i = G_i(z_i)$$

— l'étalement de chaque station, relatif au régime naturel permanent :

$$Q'_i = E'_i(z'_i)$$

— les relations liant entre eux, pour le régime naturel permanent, et dans le cas d'un écoulement non filaire, les débits passant aux différentes stations :

$$Q'_{i+1} = F'_i(Q'_i)$$

On fait en outre l'hypothèse que ces dernières relations sont peu modifiées par la présence du barrage, et on a donc :

$$Q_{i+1} = F_i(Q_i) \quad (7)$$

La courbe de remous est déterminée le long d'un chenal, en développant le calcul de l'aval vers l'amont. Elle est relative à une cote donnée à la station la plus à l'aval, et un débit — ou une cote — donné passant à la station la plus à l'amont. Le processus est le suivant :

Calculs préliminaires

On détermine à partir des relations 7, les débits (Q_i) passant par chacune des stations, et correspondant au débit donné à la station la plus à l'amont. On détermine également, pour la station la plus à l'aval où la cote est connue (z_1), la section mouillée ($S_1 = G_1(z_1)$) et la charge hydraulique (H_1 , à partir de la relation 0).

Calcul d'aval en amont

z_i, S_i, H_i étant connus, on détermine pour les stations i et $i+1$, la charge hydraulique correspondant à la cote z_i à la station i dans le régime naturel :

$$z'_i = z_i \quad \implies \quad S'_i = S_i$$

$$Q'_i = E'_i(z'_i) = E'_i(z_i)$$

$$Q'_{i+1} = F'_i(Q'_i)$$

$$z'_{i+1} = (E'_{i+1})^{-1}(Q'_{i+1})$$

$$S'_{i+1} = G_{i+1}(z'_{i+1})$$

$$H'_i = z_i + (Q'_i/S'_i)^2/(2.g)$$

$$H'_{i+1} = z'_{i+1} + (Q'_{i+1}/S'_{i+1})^2/(2.g)$$

On calcule ensuite la charge à la station $i+1$ pour le régime influencé par la retenue, à partir de la relation 4, dans laquelle $D1_i$ est déterminé directement par la relation 5, et où, à la place du terme $D2_i$, donné par l'équation 6, on utilise $D2_{i-1}$. En effet, S_{i+1} n'étant pas encore connu à ce stade du calcul, $D2_i$ ne pourrait être déterminé ici que par un calcul itératif qui alourdirait inutilement la méthode, puisque de toute façon, $D2$, toujours très inférieur à $D1$, n'intervient qu'en terme correctif. Prendre $D2_{i-1}$ à la place de $D2_i$ donne une précision suffisante, en évitant l'accumulation d'erreurs qu'entraînerait la négligence systématique des termes $D2$.

Une fois déterminé H_{i+1} , un calcul itératif simple, faisant intervenir la relation 0 et la fonction G_{i+1} , permet d'obtenir les valeurs de z_{i+1} et S_{i+1} .

On réitère ensuite ces calculs entre les stations $i+1$ et $i+2$, et ainsi de suite.

3.2. ADAPTATION DE LA MÉTHODE AU CAS DU BARRAGE DE DIAMA

L'ensemble des calculs porte sur des valeurs de cotes moyennes journalières.

Comme il est dit dans l'exposé des principes généraux du modèle, la première étape du calcul consiste à déterminer la cote à Rosso par une adaptation du modèle de LAMAGAT, calé sur les données du régime influencé. La méthode de SILBER est ensuite appliquée suivant la procédure de calcul indiquée plus haut, en retenant comme fonctions F' , celles qui se déduisent du modèle de propagation de LAMAGAT calé en régime naturel, et en considérant les temps de propagation correspondants. De même que pour les relations F' , on suppose que les temps de propagation ne sont pas modifiés de façon importante par la présence du barrage.

3.2.1. Cas du niveau constant dans la retenue de Diama

Comme on l'a vu plus haut, les données à entrer dans le cas général sont une cote à l'amont (Bakel ou Kaédi), et une cote à Diama. Le modèle se présente, par exemple dans le cas d'une prévision à partir de Kaédi, le long de la branche Sénégal, de la façon suivante :

— les données en entrée sont :

$z_0(t)$ cote IGN à Kaédi à l'instant t ,
 Z cote constante dans la retenue ;

— les données en sortie sont :

$z_i(t+Dt_i)$ cote IGN à la station i au temps $t+Dt_i$

l'indice i variant de 1 (Rosso) à 5 (Salde), et Dt_i désignant le temps de propagation (dépendant de $z_0(t)$) entre Kaédi et la station i .

3.2.2. Cas du niveau variable dans la retenue de Diama

Le calcul se fait de la même façon que dans le cas précédent, mais le résultat ne concerne cette fois, de façon rigoureuse, qu'une seule station, qui dépend de la date de la cote dans la retenue introduite dans le modèle. Le principe est le suivant :

Soit $z_0(t)$ la cote IGN à Kaédi à l'instant t . Cette cote nous donne les temps de propagation Dt_i définis ci-dessus.

Pour obtenir le remous à la station i , au temps $t + Dt_i$, la date $t + Dt_0$ à prendre en compte pour la cote dans la retenue est égale à :

$$t + Dt_0 = t + 2.Dt_i - Dt_i.$$

En effet, les réactions du lac et de la station de Rosso aux informations venues de l'amont pouvant être considérées comme simultanées, on en déduit que le temps de propagation de l'amont vers l'aval, entre la station i et le lac, peut être assimilé à $Dt_1 - Dt_i$. La faiblesse des pentes et des vitesses en jeu, nous autorise à faire l'hypothèse

que la propagation d'une impulsion se fait à une vitesse comparable dans les deux sens. Le temps de propagation de l'aval vers l'amont, entre le lac et la station i , est donc égal à $D_{t_1} - D_{t_i}$. Moyennant l'hypothèse que les cotes aux stations à l'aval de la station i , entre les temps $t + 2D_{t_1} - D_{t_i}$ et $t + D_{t_i}$, résultent de cotes proches de $z_6(t)$ à Kaédi, on voit donc que la cote dans le lac, influençant la cote à la station i à l'instant $t + D_{t_i}$, se situe à la date :

$$t + D_{t_0} = t + D_{t_i} - (D_{t_1} - D_{t_i}) = t + 2.D_{t_i} - D_{t_1}$$

Le modèle se présente donc, dans ce cas, comme suit :

— les données en entrée sont :

$z_6(t)$ cote IGN à Kaédi à l'instant t ,
 $Z(t + 2.D_{t_i} - D_{t_1})$ cote dans la retenue à l'instant $t + 2.D_{t_i} - D_{t_1}$

— la donnée en sortie est :

$z_i(t + D_{t_i})$ cote IGN à la station i au temps $t + D_{t_i}$

4. DONNÉES NUMÉRIQUES

4.1. SECTIONS MOUILLÉES : RELATIONS G

Les tracés de profils en travers disponibles à l'OMVS permettent d'établir, en connaissant l'altitude des zéros d'échelles (Tabl. Ia et IIa), les relations G donnant les sections mouillées en fonction de la cote IGN des plans d'eau. Ces relations sont données, de façon indirecte, dans les tableaux Ib et Ic pour la branche Doué, et IIb et IIc pour la branche Sénégal.

4.2. ÉTALONNAGES RELATIFS AU RÉGIME NATUREL : RELATIONS E'

Hormis Salde, Ngoui et Kaedi, situées en amont des seuils de Dioulde-Diabe sur le Sénégal et Cogna sur le Doué (BÉLIME 1922), les stations envisagées figurent dans le bief maritime du fleuve, dans lequel les débits d'étiage et de basses eaux ne sont plus mesurables du fait de l'influence de la marée (ROCHETTE, 1974). Les courbes d'étalonnages de basses eaux ne peuvent donc être obtenues que par une forte extrapolation, pour laquelle le tracé du profil en long du fleuve Sénégal (UHEA 1950), nous donne de précieuses informations. On y voit en effet que le niveau des seuils existant à l'aval de Podor, est toujours inférieur à 0 m IGN. On est donc amené à envisager, pour les stations de Rosso, Dagana, Podor et Guede, une annulation du débit de régime permanent théorique, pour la cote 0 m IGN. La station de Boghe se trouve à l'amont d'un seuil coté à 1,05 m IGN (M'Barobé). Les relations obtenues sur les cotes, avec les stations voisines, nous ont cependant amenés à y annuler le débit, non pas à cette cote, mais à 0 m IGN comme pour les stations précédentes.

Pour l'ensemble des stations, les étalonnages présentent l'inconvénient de n'être pas bi-univoques, du fait de la faiblesse des pentes. Une amélioration (LAMAGAT, 1989-a) de la méthode du gradient limnimétrique (BRUNET-MORET *et al.*, 1986), permet d'exprimer, dans de tels cas, le débit de la façon suivante :

$$Q = Q_0(h).(1 + K(h).G)^{0.5}$$

avec :

$Q_0(h)$ ($m^3.s^{-1}$) : le débit correspondant à la cote h , en régime permanent
 G ($cm.jour^{-1}$) : le gradient limnimétrique à la station
 $K(h)$ ($cm^{-1}.jour$) : le coefficient de correction de gradient

Cette méthode a été utilisée pour déterminer la courbe d'étalonnage correspondant au régime permanent (relation E'), pour chacune des stations. Ces étalonnages sont donnés de façon indirecte dans les tableaux Ib et Id pour la branche Doué, et IIb et IIc pour la branche Sénégal. Selon les stations, les valeurs indiquées proviennent soit de calculs menés dans le cadre de cette étude, soit des calculs effectués par LAMAGAT (1989-a).

Le tableau III donne les valeurs obtenues aux différentes stations pour les coefficients de correction de gradient.

Remarque. L'étalonnage du régime permanent obtenu pour Rosso, par la méthode du gradient limnimétrique, n'a pas été retenu, du fait qu'il entraînait une anomalie inacceptable dans la relation liant les débits de Rosso et de

TABLEAU Ia
Cotes IGN (m) des zéros d'échelles des stations (branche Doué)

Bakel	Kaedi	Ngoui	Guede	Dagana	Rosso
11.16	3.85	-0.45	-0.63	-0.44	-0.23

TABLEAU Ib
Correspondance des niveaux IGN (m) entre les stations (branche Doué)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Bakel	11.61	12.33	12.84	13.45	13.90	14.32	14.69	15.00	15.27	15.56	15.84	16.21	16.62	16.91	17.32	17.86	18.44	19.04	19.61	20.15	20.68	21.19	21.67	22.13	22.60	23.07	23.49
Kaedi	3.15	3.95	4.62	5.47	6.23	6.82	7.30	7.70	8.07	8.41	8.73	9.04	9.35	9.63	9.91	10.17	10.43	10.69	10.93	11.16	11.39	11.60	11.81	12.01	12.21	12.41	12.59
Ngoui	1.54	2.29	2.92	3.76	4.47	5.00	5.51	5.98	6.36	6.74	7.11	7.42	7.75	8.08	8.35	8.62	8.87	9.11	9.37	9.61	9.82	10.00	10.18	10.36	10.57	10.82	11.06
Guede	0.02	0.10	0.40	1.23	1.92	2.50	2.97	3.34	3.75	4.10	4.36	4.51	4.75	4.94	5.12	5.38	5.58	5.73	5.89	6.00	6.11	6.17	6.27	6.39	6.49	6.64	6.76
Dagana	0.02	0.10	0.26	0.38	0.49	0.57	0.78	0.92	1.06	1.20	1.34	1.47	1.63	1.78	1.84	2.05	2.21	2.36	2.46	2.60	2.71	2.82	2.97	3.06	3.15	3.37	3.40
Rosso	0.01	0.09	0.25	0.35	0.44	0.50	0.66	0.77	0.87	0.99	1.10	1.21	1.34	1.45	1.50	1.67	1.79	1.91	1.99	2.11	2.19	2.28	2.40	2.47	2.54	2.64	2.74

TABLEAU Ic
Correspondance des sections mouillées (m²) entre stations (branche Doué)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Kaedi	465	620	751	914	1074	1190	1287	1385	1482	1567	1655	1739	1835	1920	2013	2100	2194	2280	2367	2440	2526	2594	2672	2745	2823	2898	2967
Ngoui	290	430	550	723	883	1004	1125	1240	1331	1426	1515	1586	1668	1751	1812	1880	1940	2000	2067	2130	2183	2226	2270	2314	2365	2425	2483
Guede	80	90	130	255	367	456	538	602	677	740	784	812	857	893	930	982	1020	1049	1081	1104	1127	1142	1163	1185	1208	1240	1264
Dagana	1500	1530	1580	1628	1675	1710	1790	1850	1905	1960	2020	2075	2140	2205	2230	2330	2400	2468	2510	2580	2625	2680	2750	2790	2830	2890	2950
Rosso	1540	1560	1620	1660	1690	1720	1780	1840	1880	1940	2000	2050	2120	2180	2210	2310	2380	2450	2510	2580	2640	2700	2780	2830	2880	2950	3030

TABLEAU Id
Correspondance des débits (m³.s⁻¹) entre les stations (branche Doué)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Kaedi	1.33	39	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500
Ngoui	1.00	10	30	80	132	176	216	257	301	350	400	448	507	579	651	727	804	886	976	1072	1163	1256	1360	1491	1688	1920	2152
Guede	2.00	6	30	100	163	217	261	295	333	373	407	431	472	508	545	598	647	682	721	748	776	793	818	849	876	917	948
Dagana	1.50	35	130	210	285	335	484	590	684	789	891	994	1112	1220	1264	1418	1538	1657	1733	1844	1931	2017	2131	2201	2275	2378	2482
Rosso	1.50	35	130	210	285	335	484	590	684	789	891	994	1112	1220	1264	1418	1538	1657	1733	1844	1931	2017	2131	2201	2275	2378	2482

TABLEAU Ie
Temps de propagation (jours) depuis Bakel (branche Doué)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Kaedi	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6	7	8	8	9	10	10	11	12	12
Ngoui	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	8	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Guede	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	9	10	11	13	14	15	16	17	18	19	20	21	23	24
Dagana	8	8	8	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12	12	14	15	17	20	21	23	25	27	30	31	34	36	37
Rosso	8	8	8	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12	13	15	16	18	21	22	24	26	28	31	32	35	37	38

TABLEAU Ia
Cotes IGN (m) des zéros d'échelles des stations (branche Sénégal)

Bakel	Kaedi	Salde	Boghe	Podor	Dagana	Rosso
11.16	3.85	1.32	-0.57	-0.44	-0.44	-0.23

TABLEAU Ib
Correspondance des niveaux IGN (m) entre les stations (branche Sénégal)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Bakel	11.61	12.33	12.84	13.45	13.90	14.32	14.69	15.00	15.27	15.56	15.84	16.21	16.62	16.91	17.32	17.86	18.44	19.04	19.61	20.15	20.68	21.19	21.67	22.13	22.60	23.07	23.49
Kaedi	3.15	3.95	4.62	5.47	6.23	6.82	7.30	7.70	8.07	8.41	8.73	9.04	9.35	9.63	9.91	10.17	10.43	10.69	10.93	11.16	11.39	11.60	11.81	12.01	12.21	12.41	12.59
Salde	1.34	2.15	2.85	3.70	4.40	5.01	5.51	5.95	6.34	6.68	7.01	7.33	7.61	7.94	8.24	8.54	8.84	9.15	9.47	9.79	10.05	10.23	10.42	10.57	10.76	11.00	11.22
Boghe	0.13	0.34	0.65	1.47	2.07	2.63	3.09	3.50	3.90	4.28	4.61	4.91	5.25	5.64	6.07	6.44	6.82	7.06	7.32	7.52	7.64	7.82	8.04	8.22	8.43	8.59	8.72
Podor	0.02	0.10	0.34	0.54	0.71	0.85	1.17	1.46	1.75	2.04	2.35	2.60	2.89	3.22	3.33	3.60	3.87	4.13	4.32	4.56	4.76	4.95	5.20	5.33	5.48	5.78	6.00
Dagana	0.02	0.10	0.26	0.38	0.49	0.57	0.78	0.92	1.06	1.20	1.34	1.47	1.63	1.78	1.84	2.05	2.21	2.36	2.46	2.60	2.71	2.82	2.97	3.06	3.15	3.27	3.40
Rosso	0.01	0.09	0.25	0.35	0.44	0.50	0.66	0.77	0.87	0.99	1.10	1.21	1.34	1.45	1.50	1.67	1.79	1.91	1.99	2.11	2.19	2.28	2.40	2.47	2.54	2.64	2.74

TABLEAU Ic
Correspondance des sections mouillées (m²) entre stations (branche Sénégal)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Kaedi	465	620	751	914	1074	1190	1287	1385	1482	1567	1655	1739	1835	1920	2013	2100	2194	2280	2367	2440	2526	2594	2672	2745	2823	2898	2967
Salde	30	90	150	245	335	424	500	570	634	694	748	805	855	910	964	1018	1073	1129	1193	1258	1317	1358	1407	1445	1494	1560	1623
Boghe	110	130	161	263	354	440	515	584	657	725	781	832	888	961	1045	1114	1190	1241	1295	1337	1365	1404	1454	1493	1535	1572	1600
Podor	905	915	952	980	1004	1022	1065	1108	1155	1200	1250	1290	1335	1385	1405	1450	1495	1535	1570	1610	1645	1680	1725	1745	1770	1825	1865
Dagana	1500	1530	1580	1628	1675	1710	1790	1850	1905	1960	2020	2075	2140	2205	2230	2330	2400	2468	2510	2580	2625	2680	2750	2790	2830	2890	2950
Rosso	1540	1560	1620	1660	1690	1720	1780	1840	1880	1940	2000	2050	2120	2180	2210	2310	2380	2450	2510	2580	2640	2700	2780	2830	2880	2950	3030

TABLEAU Id
Correspondance des débits (m³.s⁻¹) entre les stations (branche Sénégal)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Kaedi	1.33	39	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500
Salde	1.00	24	61	113	161	205	247	288	328	368	411	458	510	573	640	713	787	860	920	967	1004	1041	1089	1130	1188	1270	1351
Boghe	1.00	10	29	110	183	256	317	375	433	491	545	599	660	734	822	899	977	1031	1093	1143	1174	1226	1294	1352	1434	1508	1591
Podor	1.00	20	74	122	164	200	280	362	443	525	615	691	777	881	916	1002	1091	1179	1244	1331	1398	1467	1555	1609	1665	1745	1825
Dagana	1.50	35	130	210	285	335	484	590	684	789	891	994	1112	1220	1264	1418	1538	1657	1733	1844	1931	2017	2131	2201	2275	2378	2482
Rosso	1.50	35	130	210	285	335	484	590	684	789	891	994	1112	1220	1264	1418	1538	1657	1733	1844	1931	2017	2131	2201	2275	2378	2482

TABLEAU Ie
Temps de propagation (jours) depuis Bakel (branche Sénégal)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
Kaedi	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6	7	8	8	9	10	10	11	12	12	
Salde	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6	6	6	6	6	6	6	7	8	10	10	12	14	15	16	18	18	
Boghe	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	8	8	8	8	10	12	14	14	16	18	19	20	22	23
Podor	7	7	7	7	7	7	8	8	8	9	9	10	10	10	12	13	14	16	18	20	21	23	25	26	28	31	32	
Dagana	8	8	8	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12	12	14	15	17	20	21	23	25	27	30	31	34	36	37	
Rosso	8	8	8	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12	13	15	16	18	21	22	24	26	28	31	32	35	37	38	

TABLEAU III
Coefficients de correction de gradient K (jour.cm⁻¹) en fonction de la cote h(cm) aux échelles

Kaédi	h	-80	530	580	620	660	700	800	1010								
	K	0.015	0.015	0.016	0.018	0.019	0.021	0.028	0.028								
Salde	h	0	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	
	K	0	0	0.001	0.003	0.007	0.011	0.016	0.022	0.029	0.033	0.035	0.033	0.026	0.016	0.01	
Boghe	h	0	300	500	540	750	825	885	1110								
	K	0.005	0.015	0.024	0.025	0.04	0.041	0.033	0.033								
Podor	h	0	300	400	550	600											
	K	0.033	0.033	0.04	0.055	0.055											
Ngoui	valeur unique de K: 0.024																
Guede	h	0	500	510	640	650	700										
	K	0.01	0.01	0.028	0.028	0.024	0.024										
Dagana	h	0	100	150	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	435	600	
	K	0.007	0.007	0.009	0.013	0.015	0.018	0.024	0.03	0.034	0.033	0.03	0.024	0.015	0.01	0.01	
Rosso	h	0	100	120	170	190	240	260	360								
	K	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.045	0.045								

Dagana. En effet, en dessous de 2 000 m³.s⁻¹, les premiers présentaient alors des valeurs systématiquement supérieures aux seconds, de 150 m³.s⁻¹ en moyenne. L'inverse eût pu être acceptable, du fait qu'entre Dagana et Rosso, les pertes (dans la Taouey et vers le lac de Rkiz, en rive droite) sont globalement plus importantes que les apports (ROCHETTE 1974). Il a finalement été décidé pour cette station, de conserver la relation donnant le coefficient de correction de gradient en fonction de la cote, mais de prendre pour étalonnage en régime permanent, celui qu'on obtient à partir de la relation liant les cotes de Rosso et Dagana, en faisant l'hypothèse que les débits sont constamment égaux aux deux stations.

4.3. RELATIONS LIANT LES DÉBITS PASSANT AUX DIFFÉRENTES STATIONS : F'

Il s'agit ici de caler le modèle de propagation de LAMAGAT, selon le principe évoqué plus haut (paragr. 2.2). Les calculs de régressions ont porté sur les débits moyens journaliers élaborés à partir des étalonnages non bi-univoques, en utilisant des échantillons aussi grands que possible, antérieurs à l'érection du barrage. Les périodes retenues sont les suivantes :

- 1955 à 1985 pour Salde - Kaédi
- 1955 à 1972 pour Boghe - Salde (Boghe fermée en 1972)
- 1972 à 1985 pour Podor - Salde
- 1972 à 1985 pour Dagana - Podor
- 1955 à 1985 pour Ngoui - Kaédi
- 1955 à 1985 pour Guede - Ngoui

Un calcul similaire a été fait sur les cotes moyennes journalières, entre Dagana et Rosso (Cf. paragr. 4.2) de 1955 à 1985, et entre Kaédi et Bakel, de 1972 à 1985 (la station de Bakel a subi un détamage aux alentours de l'année 1972).

Sur la branche Sénégal, le mode de propagation des débits semble s'être modifié depuis 1972, avec un raccourcissement des temps de propagation. Le modèle, calé sur les données de 1955 à 1985, ne donne donc pas une bonne restitution des débits récents pour Podor et les stations à l'aval. Le calage sur 1972-1985, qui a été retenu, donne de bien meilleurs résultats.

Les tableaux Id et Ie pour la branche Doué, et IId et IIe pour la branche Sénégal, donnent respectivement les relations liant les débits aux différentes stations, et les temps de propagation correspondants.

4.4. RELATIONS DONNANT LA COTE À ROSSO EN FONCTION DE LA COTE À DIAMA, ET DE LA COTE À KAÉDI OU BAKEL

L'échantillon de cotes disponible pour 1988, 1989 et début 1990 nous permet d'établir des relations (tableaux IV et V) liant la différence de cote entre Rosso et la retenue, à la cote à Bakel ou à Kaédi, conformément aux temps de propagation indiqués dans le tableau Ie.

TABLEAU IV
Correspondance entre la cote à Bakel et la dénivelée entre Rosso et Diama

Cote à l'échelle de Bakel (cm)	200	250	550	750	850
Dénivelée entre Rosso et Diama (cm)	0	3	66	71	85

TABLEAU V
Correspondance entre la cote à Kaédi et la dénivelée entre Rosso et Diama

Cote à l'échelle de Kaédi (cm)	250	400	500	550	650	700
Dénivelée entre Rosso et Diama (cm)	0	29	44	56	79	94

5. RÉSULTATS OBTENUS

L'application du modèle a été faite sur la base des données numériques figurant dans les tableaux I à V, en faisant abstraction de la non-biunivocité des étalonnages.

5.1. CAS THÉORIQUE DU NIVEAU CONSTANT DANS LE LAC DE DIAMA

Tel qu'il est décrit au paragraphe 3.2.1, le modèle permet d'établir pour une cote z donnée à la station « préverseur » de l'amont à l'instant t , et une cote constante Z dans la retenue, une sorte de ligne d'eau diachronique passant par les cotes résultantes $z_i(t + Dt_i)$ aux stations intermédiaires.

La figure 5, où les points sont artificiellement reliés entre eux pour permettre une meilleure visualisation, donne l'exemple de telles lignes d'eau, obtenues dans le cas de calculs effectués sur la branche Sénégal, à partir de Kaédi.

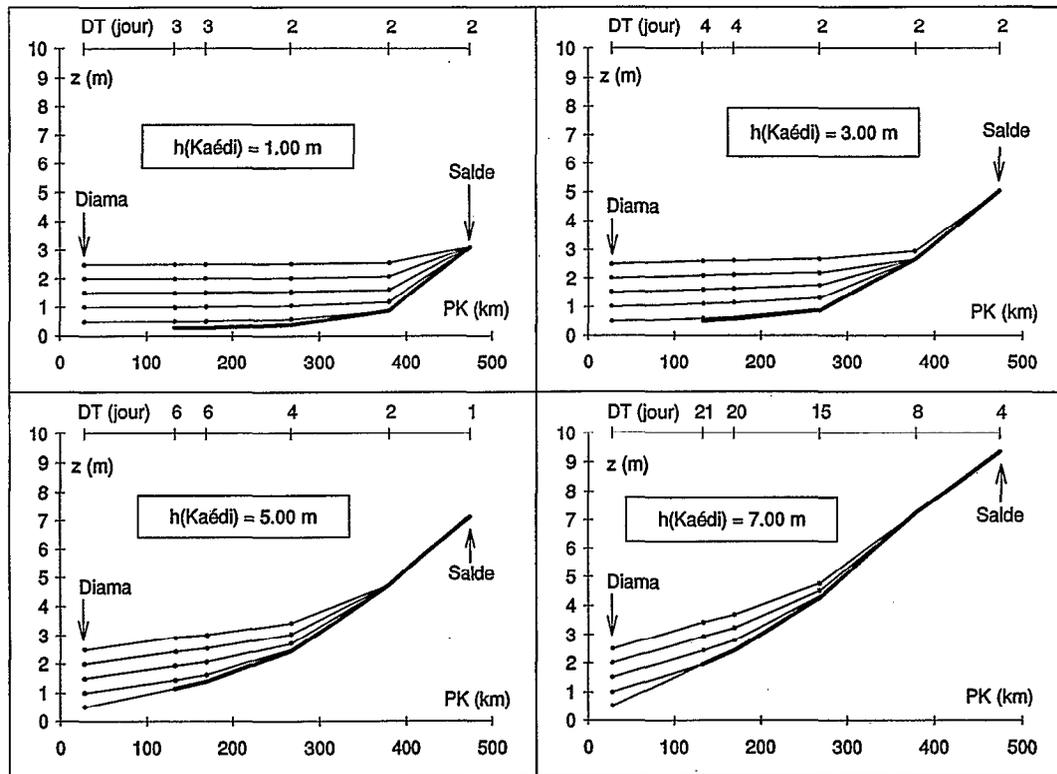


FIG. 5. — Comparaison des lignes d'eau modélisées pour différentes cotes à Diama, avec la ligne d'eau naturelle (branche Sénégal).

Pour une cote h à l'échelle de Kaédi au temps t , la cote IGN z aux stations situées à l'aval est donnée pour le temps $t + Dt$. La ligne d'eau naturelle est indiquée en trait gras.

Pour les stations influencées, on y observe conformément à la logique, que le réhaussement des cotes par rapport au régime naturel, est croissant avec le niveau dans le lac, décroissant avec les cotes de la station « préviseur » de l'amont, et décroissant avec la distance séparant la station du barrage.

Dans la limite des cotes IGN testées pour le niveau dans le lac (de 0.50 m à 2.50 m), on constate que la limite d'influence de la retenue se situe toujours à l'aval de Salde et de Ngoui.

5.2. CAS RÉEL DU NIVEAU VARIABLE DANS LA RETENUE DE DIAMA

Le modèle décrit au paragraphe 3.2.2 a été testé en comparant les cotes qu'il permet de reconstituer pour les différentes stations, avec les cotes observées de janvier 1988 à février 1990. A titre d'exemples, les figures 6 et 7 donnent pour Dagana et Podor les graphiques correspondants, où sont également tracés les limnigrammes théoriques du régime naturel (modélisés à partir des cotes observées à Kaédi). Sur ces figures, les cotes sont relatives aux zéros d'échelles.

Le tableau VI donne les erreurs absolues moyennes (EAM) obtenues, entre cotes reconstituées et observées, ainsi que les valeurs extrêmes des horizons de prévision à partir de Diama (Dt_1 - Dt_i), Kaédi (Dt_i) et Bakel (Dt_i). On constate, bien que les horizons de prévision soient parfois assez importants (Kaédi : 18 jours, Bakel : 24 jours, Diama : 9 jours), que les reconstitutions effectuées avec le modèle sont relativement satisfaisantes pour toutes les stations, avec des valeurs d'erreur absolue moyenne comprises entre 5 % et 11 % des écart-types naturels obtenus sur les

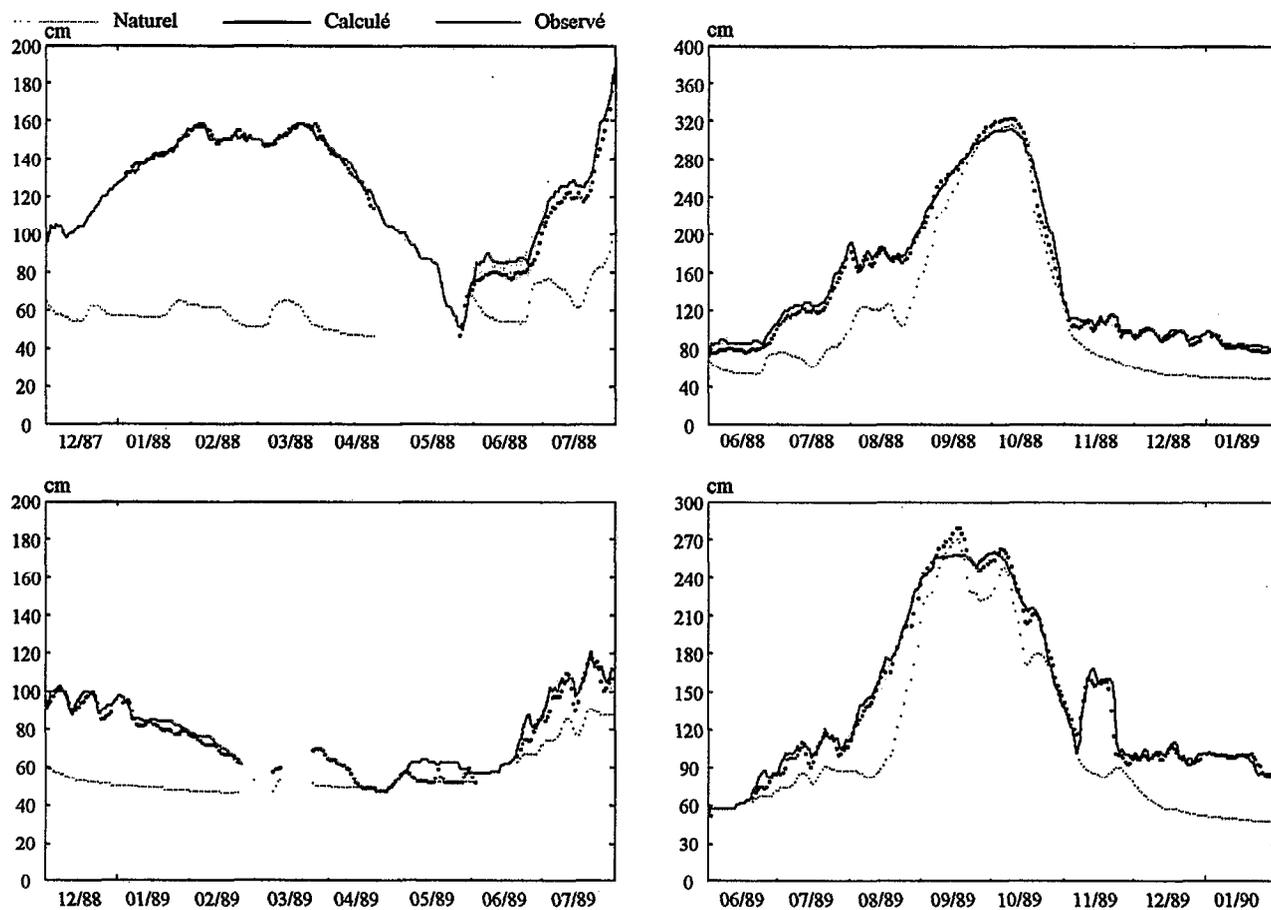


FIG. 6. — Comparaison des cotes modélisées pour Dagana, à partir de Kaédi et Diama, avec les valeurs naturelles théoriques (calcul à partir de Kaédi), et avec les valeurs observées.

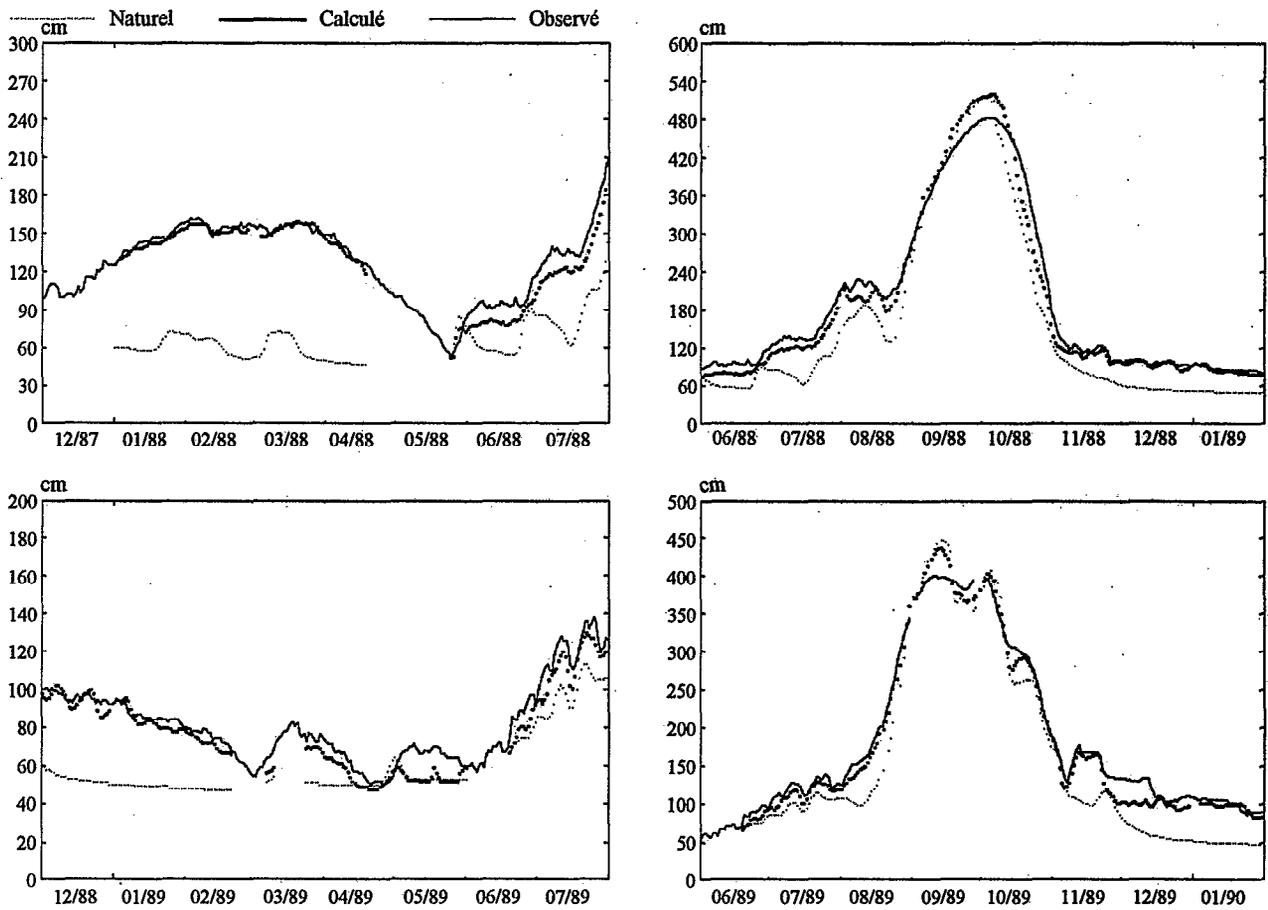


FIG. 7. — Comparaison des cotes modélisées pour Podor, à partir de Kaédi et Diama, avec les valeurs naturelles théoriques (calcul à partir de Kaédi), et avec les valeurs observées.

TABLEAU VI
Erreurs absolues moyennes sur les cotes journalières reconstituées (jan. 1988 - fév. 1990)

station	Cotes observées				Modèle de la courbe de remous							
	Minimum (cm)	Maximum (cm)	Moyenne (cm)	Ecart type (cm)	(Kaédi, Diama)			(Bakel, Diama)			HP (Diama)	
					EAM (cm)	HP (Kaédi) (jour)		EAM (cm)	HP (Bakel) (jour)		HP (Diama) (jour)	
						min	max		min	max	min	max
Rosso	19	253	100	57	3	3	18	5	8	26	0	0
Dagana	50	312	136	64	5	3	17	6	8	25	0	1
Podor	49	482	155	105	10	2	13	12	7	21	1	5
Guede	54	656	212	177	11	3	9	15	8	17	0	9
Salde *	-38	851	229	234	21	2	2	25	7	10	1	16
Ngoui *	177	1015	420	268	15	1	4	24	6	12	2	14
Kaédi *	-110	756	140	234				19	5	8	3	18

avec: EAM : écart absolu moyen, entre cotes observées et cotes reconstituées par le modèle.

HP : horizon de prévision à partir de la station spécifiée.

* : stations toujours situées en dehors du remous de la retenue.

échantillons de cotes observées. La précision est d'autant meilleure que les stations sont plus proches de Diama, et qu'elles présentent ainsi une moindre amplitude de variation de cote, du fait de l'amortissement naturel des crues qui se traduit par une diminution du marnage d'amont en aval d'une part, et de l'influence accrue de la retenue dont le marnage est également faible, d'autre part. Les valeurs de EAM restent, pour toutes les stations influencées par la retenue, en dessous de 15 cm dans le cas d'un calcul effectué à partir de Bakel, et en dessous de 11 cm dans le cas d'un calcul effectué à partir de Kaédi.

Remarque. Les valeurs relativement fortes de EAM obtenues pour les stations de Salde et Ngoui s'expliquent par la construction annuelle, depuis 1988, d'une digue de franchissement temporaire de basses eaux située juste en amont de la station de Ngoui. Cet ouvrage provoque un abaissement des cotes de basses eaux à cette station, et un réhaussement simultané à Salde (visible sur la figure 4 en décembre 1988), dont la modélisation ne peut rendre compte, du fait que le calage des fonctions F_i s'appuie sur des données antérieures à 1988.

6. CONCLUSION

Malgré la complexité des écoulements (étalonnages non bi-univoques, bras multiples, influence marine sur le régime naturel), le couplage du modèle de propagation de LAMAGAT avec la méthode de SILBER donne une précision satisfaisante pour la prévision des cotes aux stations situées dans le remous du barrage de Diama. La mise en œuvre de la méthode n'a nécessité qu'un calage de paramètres effectué sur les données relatives au régime naturel du fleuve, hormis la station de Rosso pour laquelle ont été utilisées des données relatives au régime influencé par la retenue. Cette station, la plus en aval ayant été étalonnée, se situe en effet trop loin de Diama pour que la cote y soit confondue avec celle de la retenue. Si toutefois cela avait été le cas, on aurait pu se passer entièrement de données relatives au régime influencé. On voit ici l'intérêt général de la méthode.

REMERCIEMENTS

L'auteur exprime ses remerciements à M. J.P. LAMAGAT, pour ses précieux conseils sur cette étude, ainsi que MM. G. DUBÉE et Y. PÉPIN, pour la recherche des données.

Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 16 janvier 1993

BIBLIOGRAPHIE

- BELIME (E.), 1922. — *Rapport sur les possibilités d'aménagement offertes par la vallée du fleuve Sénégal.*
- BRUNET-MORET (Y.), CHAPERON (P.), LAMAGAT (J.P.), MOLINIER (M.), 1986. — Monographie hydrologique du fleuve Niger, tome 2, cuvette lacustre et Niger moyen. *Monographies hydrologiques* n° 8, Orstom, Paris.
- LAMAGAT (J.P.), 1989-a. — *Prévision des débits de gestion des ouvrages communs de l'OMVS. Modèle de transformation des hauteurs en débits.* OMVS, Orstom, Dakar, *multigr.*
- LAMAGAT (J.P.), 1989-b. — *Modèle de propagation des crues du fleuve Sénégal. Calage des paramètres.* OMVS, Orstom, Dakar, *multigr.*
- ROCHETTE (C.), 1974. — Le bassin du fleuve Sénégal. *Monographies hydrologiques* n° 1, Orstom, Paris.
- RODIER (J.), 1964. — Régimes hydrologiques de l'Afrique Noire à l'Ouest du Congo. *Mém. Orstom* n° 6, Paris.
- SEGUIS (L.), 1991. — *Notice d'utilisation du logiciel PROGESEN.* OMVS, Orstom, Dakar, *multigr.*
- SILBER (R.), 1968. — *Étude et tracé des écoulements permanents en canaux et rivières.* Dunod, Paris.
- UHEA, 1950. — *Notice d'accompagnement du canevas synoptique des aménagements du fleuve Sénégal.* Gouvernement Général de l'AOF. Territoires du Sénégal et du Soudan.