

ORGANISATION POUR LA MISE  
EN VALEUR DU FLEUVE  
SENEGAL

**O.M.V.S.**



L'Institut Français de  
Recherche Scientifique  
pour le Développement  
en Coopération



# **ETUDES DE L'OPTIMISATION DE LA GESTION DES AMENAGEMENTS DE L'OMVS**

**PHASE I**

**RAPPORT DE SYNTHÈSE**

Auteurs : JP Lamagat, JC Bader, P Vauchel

République Française  
MISSION DE COOPERATION ET  
D'ACTION CULTURELLE  
DAKAR – SENEGAL  
M.C.A.C.

Mars 1998

# TABLE DES MATIERES

<b>PHASE 1 – SYNTHÈSE</b> .....	<b>1-1</b>
Ressources - Impact de la crue artificielle sur l'inondation de la vallée .....	1-1
Carte du bassin – Réseau des stations hydrologiques principales.....	1.3
<b>2. Analyse de la gestion de la ressource pendant la crue de 1997</b> .....	<b>2-1</b>
2.1 Rappel des travaux réalisés en préalable à la gestion de la crue de 1997.....	2-1
2.2 Rappel des objectifs retenus pour la crue de 1997 .....	2-2
2.3 Modalités pratiques de la gestion réalisée entre le 1er Septembre 1997 et février 1998.....	2-3
2.4 Résultats obtenus .....	2-4
2.5 Analyse des problèmes rencontrés .....	2-14
<b>3. Impact de la crue 1997 sur le remplissage des cuvettes dans la zone de Podor – Matam</b> ..	<b>3-1</b>
3.1 Calendrier des missions et travaux de terrain effectués .....	3-1
3.2 Premiers résultats du suivi des cuvettes .....	3-3
3.3 CONCLUSION.....	3-3

## ANNEXES

<b>Annexe 1A</b>	
Termes de références initiaux .....	1A-1
Termes de références de la 1 <sup>ère</sup> phase .....	1A-7
<b>Annexe 2A</b>	
Valeur des paramètres d'étalonnage, de modèles autorégressifs et de propagation.....	2A-1
<b>Annexe 2B</b>	
Procédures de correction manuelle des lâchés calculés par PROGEMEN .....	2B-1
<b>Annexe 2C</b>	
Evaluation en cours de crue de la possibilité d'obtenir une cote donnée dans le lac de Manantali au début de l'étiage suivant.....	2C-1
<b>Annexe 2D</b>	
Vérification du calage du modèle de Propagation amont.....	2D-1
<b>Annexe 2E</b>	
Vérification du modèle de propagation aval et de l'étalonnage de Bakel .....	2E-1
<b>ADDENDUM : crue 1997</b>	



## CARTES – FIGURES - TABLEAUX

Carte du bassin.....	1-3
Tableau 2.1.1.1 : Hydrogramme type « ORSTOM1 » .....	2-1
Figure 2.4.1.1 : Débit lâché à Manantali pour le soutien de crue de 1997 .....	2-6
Figure 2.4.2.1 : débit du Sénégal à Kayes pendant la crue de 1997 .....	2-8
Figure 2.4.3.1 : débit du Sénégal à Bakel pendant la crue de 1997 .....	2-9
Figure 2.4.4.1 : débit observé sur le Bakoye à Oualia pendant la crue de 1997.....	2-11
Tableau 2.4.7.1 : Bilan en volume écoulé à Bakel entre le 1/09/97 et le 7/12/97.....	2-12
Figure 2.4.5.1 : Débit observé sur la Falémé à Gourbassy pendant la crue 1997/1998 .....	2-13
Figure 2.5.3.1 : Etalonnage de Matam.....	2-17
Figure 2.5.3.2 : Etiage 97/98 à Bakel.....	2-18
Figure 2.5.3.3 : Bakel – Courbe de tarage – Période postérieure à 1973.....	2-19
Tableau 3.1 : Résultats du suivi des cuvettes.....	3-4
Carte n°2 : Vallée du Sénégal – Implantation des zones observées durant la campagne 97 – rive gauche .....	3-5
Cuvette de Podor.....	3-6
Variation du plan d'eau .....	3-7
Cuvette de Donaye .....	3-8
Cuvette de WAWA .....	3-9
Variations des plans d'eau dans Wawa et Donaye.....	3-10
Cuvette de Pété N'Gouï.....	3-11
Variation du plan d'eau.....	3-12
Cuvette de M'Bakhna.....	3-13
Variation du plan d'eau.....	3-14
Cuvette de Nabadji.....	3-15
Variation du plan d'eau.....	3-16
Figure 2.C.1 : probabilité d'obtenir la cote 192 m après un soutien d'étiage à 100 m <sup>3</sup> /s .....	2C-1
Figure 2.C.2 : probabilité d'obtenir la cote 192 m après un soutien de crue à 200 m <sup>3</sup> /s .....	2C-2
Figure 2D-2 : Calage du modèle de propagation amont – moyennes eaux.....	2D-2
Figure 2D-3 : temps de propagation des débits entre Manantali – Oualia et Kayes .....	2D-4
Tableau 2.D.1 : Calage du modèle de propagation de débit entre Oualia, Manantali et Kayes .....	2D-5
Tableau 2.E.1 : barème d'étalonnage de la station de Bakel, après modification des très basses eaux.....	2E-1
Etalonnage Bakel hautes eaux.....	2E-2
Etalonnage Bakel moyennes eaux .....	2E-3
Figure 2.E.1 : courbes d'étalonnage de la station de Bakel en régime permanent, après modification des très basses eaux ....	2E-4
Tableau 2.E.2 : calage du modèle de propagation de débit entre Kayes, Gourbassy et Bakel, sur différentes périodes .....	2E-6
Figures 2.E.2 : calage du modèle de propagation aval sur différentes périodes, en basses et très basses eaux .....	2E-7
Figures 2.E.3 : calage du modèle de propagation aval sur différentes périodes, en hautes et très hautes eaux .....	2E-8

## 2. Analyse de la gestion de la ressource pendant la crue de 1997

### 2.1 Rappel des travaux réalisés en préalable à la gestion de la crue de 1997

#### 2.1.1 Simulations numériques visant à optimiser le soutien de crue.

Un hydrogramme de crue appelé 'ORSTOM1' (tab. 2.1.1.1) a été défini comme objectif de crue à réaliser au niveau de Bakel. Culminant à 2500 m<sup>3</sup>/s pendant 6 jours comme l'hydrogramme 'Gibb A', il diffère essentiellement de ce dernier par une montée plus rapide permettant d'envisager un positionnement optimal en fonction des prévisions de débit sur le Bakoye et la Falémé.

Tableau 2.1.1.1 : hydrogramme type 'ORSTOM1'

Jour	0	6	11	55
Débit (m <sup>3</sup> /s)	0	2500	2500	0

A l'aide du logiciel Simulsen, des modes de soutien de crue ont été déterminés en minimisant les lâchés non turbinables. Ceux-ci sont autant de pertes pour la production électrique potentielle de Manantali. Deux cas ont été envisagés :

- **1<sup>er</sup> cas** : soutien de crue à date fixe si on ne dispose d'aucune prévision de débit à Oualia et Gourbassy. L'hydrogramme 'ORSTOM1' est alors positionné sur une date fixe optimale située environ 15 jours plus tôt que la date préconisée pour la crue « Gibb A ».
- **2<sup>ème</sup> cas** : soutien de crue à date mobile si on dispose de prévisions de débit 10 jours à l'avance à Oualia et Gourbassy. Les règles mises au point consistent alors à déclencher le soutien de crue lorsque ces prévisions annoncent l'arrivée d'une pointe de crue dépassant un certain seuil (décroissant de août à octobre) sur le Bakoye et la Falémé. Ce type de gestion peut aboutir, certaines années exceptionnellement défavorables, à l'absence de soutien de crue. Il présente néanmoins une fréquence de crues 'correctes' supérieure à celle du régime naturel, et garantit une production électrique bien meilleure que la gestion avec soutien de crue à date fixe (moyenne interannuelle de 46,1 au lieu de 29,7 MW sur la période 1970-1993, pour une puissance installée de 200 MW)

#### 2.1.2 Calage de modèles de prévision de débit par autocorrélation

Faute d'un délai suffisant, il était impossible de mettre en place pour la crue de 1997 un système d'acquisition de données en temps réel sur le haut bassin. Il aurait permis d'effectuer une prévision de débit sur le Bakoye et la Falémé par modèles hydro-pluviométriques et propagation de débit. La possibilité de faire cette prévision par autocorrélation sur quelques stations a été testée : Oualia, Gourbassy, Diangola, Fadougou, Dakka Saïdou. Compte-tenu des variations rapides de débit rencontrées sur le haut bassin du Sénégal, cette méthode ne s'applique que pour des horizons de prévision de 1 ou 2 jours, et donne des résultats de qualité moyenne.

#### 2.1.3 Simulation numérique du soutien de crue optimisé à date mobile, en cas de prévisions de débit dégradées sur le Bakoye et la Falémé.

Les règles du soutien de crue à date mobile ont été définies dans l'hypothèse de prévisions de débit à exactes à l'horizon 10 jours à Oualia et Gourbassy. Elles ont ensuite été testées avec Simulsen, dans le cas où l'on disposerait de prévisions moins performantes, obtenues par autocorrélation sur les données en temps réel de Diangola et Fadougou, et propagation jusque Oualia et Gourbassy. Les résultats obtenus montrent que même dans ce cas défavorable, le soutien de crue à date mobile permet une meilleure production électrique que le soutien à date fixe. De plus il est accompagné d'une fréquence de crue 'correcte' toujours supérieure à celle du régime naturel.

#### **2.1.4 Réalisation du logiciel Progeman et formation dispensée aux agents de l'OMVS**

PROGEMAN est un logiciel permettant de calculer en temps réel, les lâchés à effectuer à Manantali en fonction de données hydrométriques connues sur certaines stations du haut bassin, et d'un objectif de débit défini au niveau de Bakel. Ses fonctions sont présentées plus bas. Deux agents de l'OMVS, dont le gestionnaire du barrage de Manantali, ont suivi une formation de 3 jours sur son utilisation.

## **2.2 Rappel des objectifs retenus pour la crue de 1997**

### **2.2.1 Soutien de crue**

L'objectif retenu pour la saison de hautes eaux consistait à réaliser, au niveau de Bakel, un hydrogramme de type ORSTOM1 légèrement modifié (descente en marches d'escaliers). L'ORSTOM a constaté que le calcul des lâchés à effectuer à Manantali pouvait être altéré par des variations trop brutales du débit objectif à Bakel. Une décroissance progressive linéaire de l'hydrogramme a finalement été retenue. Dans les deux cas (décroissance linéaire ou en marches d'escalier), le volume écoulé est le même.

L'absence de prévisions en temps réel concernant la Falémé à l'amont de Gourbassy, et le Bakoye à l'amont de Oualia, ne permettait pas d'envisager pour 1997 un soutien de crue optimisé de façon dynamique, coïncidant avec une pointe de crue provenant de ces deux affluents. C'est donc un soutien de crue à date fixe qui a été retenu. La date optimale de début de palier à 2500 m<sup>3</sup>/s à Bakel, se situant statistiquement le 28 août dans un contexte de faible hydraulité, il avait été décidé, compte tenu de contraintes matérielles, de fixer celui-ci entre le 29 août et le 4 septembre. C'est le 1er septembre qui a finalement été retenu.

### **2.2.2 Soutien d'étiage**

L'objectif fixé à la suite du soutien de crue consiste à lâcher du barrage pendant toute la durée de l'étiage, un débit suffisant pour satisfaire les besoins en eau des cultures irriguées réparties dans la vallée du fleuve Sénégal. Ces besoins en eau, variables durant l'année, dépendent des superficies réellement exploitées et de la nature des cultures pratiquées. L'ORSTOM dispose pour le moment de trop peu d'informations sur le sujet pour pouvoir estimer précisément les débits nécessaires. Les débits à assurer à Bakel pendant la saison sèche ont été définis lors de la Commission Permanente des Eaux tenue à Nouakchott courant janvier 1998 : 90 m<sup>3</sup>/s en janvier et février, 110 m<sup>3</sup>/s de mars à mi-juin, puis 250 m<sup>3</sup>/s de mi-juin à fin juin.

### **2.2.3 Remplissage de la retenue de Manantali.**

Il a été décidé de remplir progressivement la retenue de Manantali pour que celle-ci soit pleine en l'an 2000, date prévue pour le début de la production électrique du barrage, qui se ferait alors dans les meilleures conditions possibles. L'objectif fixé pour cette année est d'obtenir dans le lac au 30 juin 1998 un niveau de plan d'eau supérieur à la cote 192 m. Cet objectif est évidemment concurrencé par les deux précédents.

## **2.3 Modalités pratiques de la gestion réalisée entre le 1er Septembre 1997 et février 1998**

### **2.3.1 Calcul des lâchés : logiciel PROGEMAN**

Durant les mois de septembre et octobre, le logiciel PROGEMAN a été utilisé pour calculer le débit à lâcher du barrage permettant d'obtenir à Bakel, quelques jours plus tard, un débit supérieur ou égal à celui de l'hydrogramme ORSTOM1. Les principales fonctions de ce logiciel sont les suivantes :

- l'enregistrement de données hydrométriques concernant les stations du haut bassin du Sénégal (en 1997 : cotes aux stations de Bakel, Kayes, Gourbassy, Oualia, et débits lâchés à Manantali) ;
- la traduction des cotes en débits (détails en annexe 2-A)
- les prévisions de cotes ou débits par modèle de propagation ou par autorégression (détails en annexe 2-A)
- le calcul du débit à lâcher à Manantali, en fonction du débit objectif fixé à Bakel et des données hydrométriques connues ou prévues sur le Bakoye et la Falémé.
- Le logiciel calcule le débit à lâcher par un processus itératif, basé sur les modèles de propagation de débit calés entre les stations de Manantali, Oualia et Kayes d'une part, et Kayes, Gourbassy et Bakel d'autre part. Le principe est le suivant : une valeur de lâcher, combinée aux débits du Bakoye et de la Falémé, donne un certain débit, à une date ultérieure, au niveau de Bakel. En fonction de l'écart obtenu entre ce débit et le débit objectif de cette même date, une nouvelle valeur de lâcher est définie, puis testée à son tour et ainsi de suite. Le processus s'arrête quand l'écart entre débit objectif et débit propagé à Bakel devient négligeable.

Ce type de calcul peut se heurter à deux écueils :

- La non convergence du processus itératif. Ce problème peut se rencontrer en cas de variation brutale du débit objectif, combinée à une variabilité importante des temps de propagation en fonction du débit. Une procédure était prévue (voir annexe 2-B) pour corriger manuellement le lâcher calculé par PROGEMAN au cas où le problème se produirait, ce qui n'a pas été le cas pendant la crue de 1997.
- La mauvaise adéquation des modèles de propagation. Les modèles de propagation utilisés sont en effet calés sur des données du régime naturel du fleuve. Ils prennent en compte de façon moyenne par tranches de débits, les divers apports ou pertes intervenus entre les stations pendant la période de calage. Il se peut que pour des raisons diverses (situation météorologique, artificialisation du régime d'écoulement, etc.) les apports ou pertes intermédiaires soient à un moment donné suffisamment différents de leurs valeurs moyennes sur la période de calage pour que la propagation des débits ne soit plus très bien représentée par les modèles utilisés. A condition que ces différences d'apports et de pertes ne varient pas de façon trop rapide (par rapport aux temps de propagation constatés entre les stations), il est possible d'effectuer un calcul de correction dit 'en boucle fermée' pour palier ce problème. Une procédure (voir annexe 2-B) a été utilisée pendant la descente de crue de 1997 pour faire ces corrections.

### **2.3.2 Détails pratiques**

Pendant la période qui nous intéresse, la transmission par radio des données de Bakel, Kayes, Gourbassy et Oualia vers Manantali a semble-t-il parfaitement fonctionné. L'agent de l'OMVS chargé de la gestion des vannes du barrage a pu ainsi utiliser le logiciel PROGEMAN trois fois par jour avec des données parfaitement à jour, pour faire le calcul des lâchés.

Grâce à l'aimable collaboration de la société Cubiertas, détentrice d'un téléphone satellite à Manantali, un contact téléphonique journalier a été assuré entre le laboratoire d'hydrologie de

l'ORSTOM à Montpellier, et le gestionnaire du barrage. Ceci a permis à l'ORSTOM de disposer des données en temps quasi-réel, et de mener le calcul des lâchés en parallèle à celui de l'OMVS pendant la crue.

Ces contacts par téléphone et fax ont également permis de résoudre les petits problèmes qui ont pu se poser. Ainsi, le gestionnaire a été amené à effectuer, sur demande de l'ORSTOM, deux légères modifications sur les fichiers du logiciel PROGEMAN, concernant l'autorégression à l'horizon 2 jours à Gourbassy (3 Septembre) et la traduction des cotes en débit à Bakel (5 Septembre). Le détail des procédures de correction des lâchés a pu être également communiqué très vite à l'OMVS (3 Septembre pour la non convergence, et 18 Septembre pour le calcul en boucle fermée), dès que celles-ci ont été définies.

En plus des données en temps réel transmises par téléphone, le gestionnaire du barrage de Manantali a communiqué à l'ORSTOM les valeurs de lâchés effectués depuis la mise en route de l'ouvrage, ainsi que celles des débits observés sur les stations du haut bassin depuis 1994. Ces données précieuses ont permis de mener certaines analyses présentées plus bas. Après homogénéisation, elles ont été, ainsi que des données récentes de la vallée récupérées auprès de la Direction de l'Hydraulique du Sénégal, introduites dans la banque de données homogénéisées gérée à l'ORSTOM. Cette dernière est actuellement à jour jusque 1996 ou 1997 selon les stations.

Le logiciel PROGEMAN a été utilisé jusqu'à la mi-octobre pour calculer les lâchés du barrage destinés au soutien de crue. Un débit sanitaire constant (en moyenne journalière) a ensuite été maintenu. A partir de mi-décembre, l'ORSTOM a donné comme consigne de ne pas utiliser le logiciel pour le calcul des lâchés destinés au soutien d'étiage. En effet, PROGEMAN utilise dans son calcul une extrapolation des données de Gourbassy par autorégression, qui n'est valable qu'en saison de hautes eaux. Compte-tenu de la décroissance très régulière des débits de tarissement sur le Bakoye et la Falémé, le calcul des lâchés peut être fait désormais manuellement jusqu'à la fin de l'étiage. On utilise pour cela les graphiques fournis avec la notice du logiciel, et qui représentent les modèles de propagation de débit utilisés.

## **2.4 Résultats obtenus**

### **2.4.1 Débits lâchés du barrage de Manantali**

Les débits lâchés du barrage sont estimés à Manantali en fonction du niveau du lac et de l'ouverture des vannes, à partir de la courbe d'étalonnage théorique de ces dernières. Ils sont représentés sur la figure 2.4.1.1, ainsi que les débits observés à la station de Makana, située à l'amont immédiat de la retenue.

Commentaires sur les débits lâchés :

- avant le 27 août, le débit lâché du barrage correspond au débit sanitaire, de l'ordre de 13 m<sup>3</sup>/s.
- du 27 août au 1er septembre, le débit lâché est égal à celui demandé par PROGEMAN pour réaliser la montée de l'hydrogramme ORSTOM1.
- du 2 au 4 septembre, on lâche un débit plus fort (environ 300 m<sup>3</sup>/s) que la valeur demandée par PROGEMAN, dans le but de compenser le déficit de débit constaté à Bakel entre le 1er et le 3 septembre par rapport à l'hydrogramme objectif.
- les 5 et 6 septembre, on lâche un débit beaucoup plus faible que celui demandé par PROGEMAN, du fait de la nécessité de fermer les vannes du barrage pendant plus de 24 heures à la suite d'une noyade à l'aval.
- les 7 et 8 septembre, on lâche un débit légèrement plus fort que celui demandé par PROGEMAN, pour compenser le déficit de lâcher des 5 et 6 septembre.
- du 9 au 17 septembre, on lâche le débit demandé par PROGEMAN



- du 18 septembre au 6 octobre, une correction systématique par boucle fermée est appliquée sur les débits demandés par PROGEMAN, pour minimiser l'excédent de débit constaté à Bakel par rapport à l'hydrogramme objectif. Sur toute cette période, les débits lâchés sont donc inférieurs à ceux demandés par PROGEMAN.
- du 7 octobre au 12 novembre, on lâche un débit sanitaire de 13 m<sup>3</sup>/s
- à partir du 13 novembre, le soutien d'étiage est engagé avec un lâché d'environ 25 m<sup>3</sup>/s jusqu'au 1er décembre, 50 m<sup>3</sup>/s jusqu'au 28 décembre, 74 m<sup>3</sup>/s jusqu'au 9 janvier et entre 100 m<sup>3</sup>/s et 114 m<sup>3</sup>/s ensuite.

Du 27 août au 7 octobre, on a lâché un volume de 2,51 Gm<sup>3</sup> à partir de la retenue pour soutenir la crue du Sénégal, dont 0,952 Gm<sup>3</sup> correspondant aux tranches de débits lâchés supérieurs à 550 m<sup>3</sup>/s (volume perdu pour un turbinage théorique).

L'application systématique d'une correction en boucle fermée sur le calcul de lâcher a permis d'économiser un volume de 0,236 Gm<sup>3</sup> entre le 18 septembre et le 7 octobre.

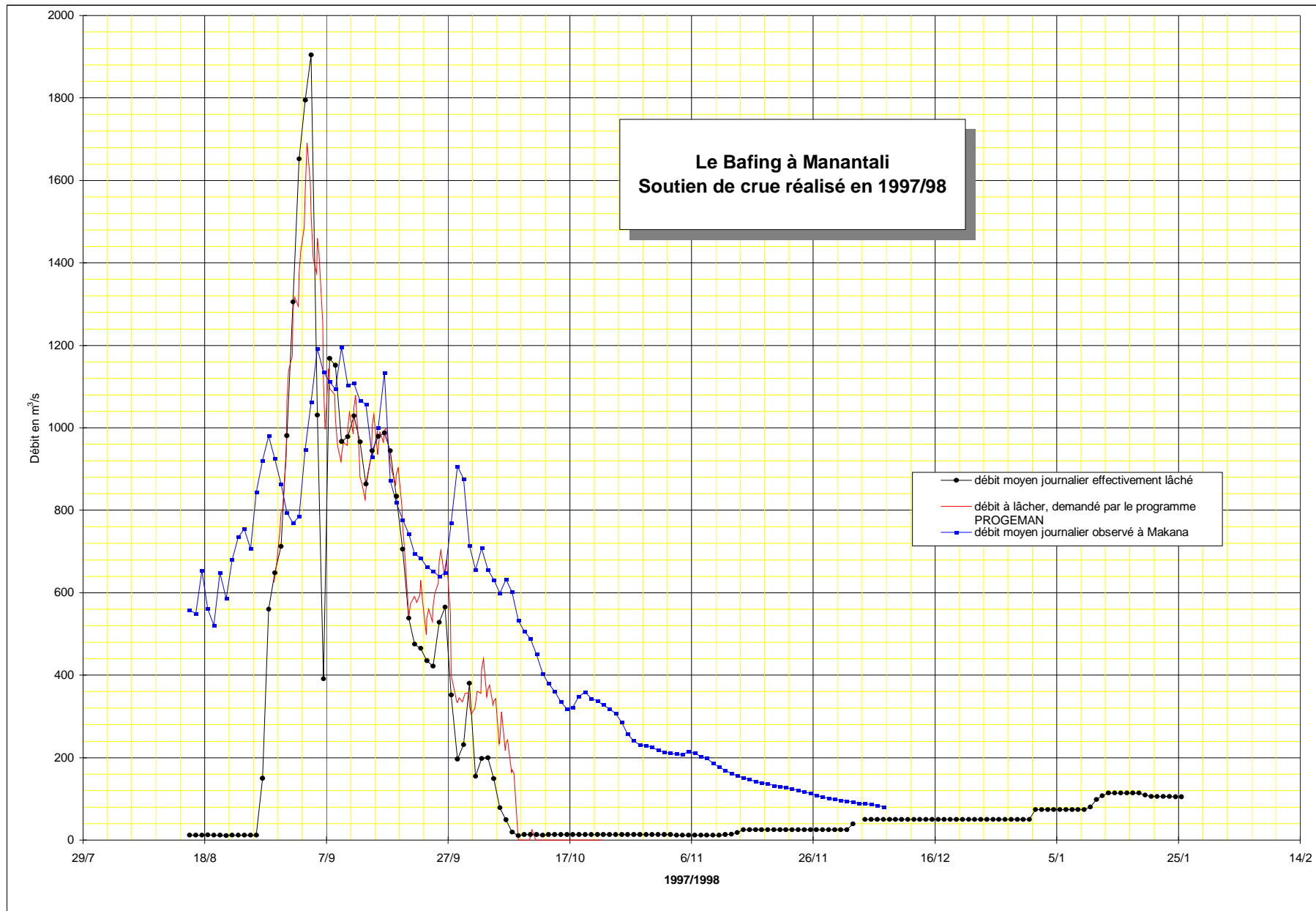


Figure 2.4.1.1 : Débit lâché à Manantali pour le soutien de crue de 1997

## 2.4.2 Débits obtenus à Kayes

Sur la période analysée du 18 août au 25 janvier, on constate que le débit obtenu à Kayes (fig.2.4.2.1) est systématiquement supérieur à celui que prévoit PROGEMAN à partir des débits lâchés à Manantali et observés à Oualia, du 18 au 30 août et du 9 septembre au 3 novembre. Une analyse est menée plus bas dans cette note, pour tenter d'élucider les causes de cette anomalie qui s'est manifestée en 1997 pour les débits compris entre 80 et 1800 m<sup>3</sup>/s.

Du 25 août au 19 octobre (période correspondant à la position de l'hydrogramme ORSTOM1 à Bakel, moins un jour pour tenir compte de la propagation entre les deux stations), il s'est écoulé un volume de 5,07 Gm<sup>3</sup> à Kayes, alors que le volume prévu à partir des débits de Oualia et des lâchés de Manantali n'était que de 4,21 Gm<sup>3</sup>.

Pour l'année 1998, l'amélioration du modèle de propagation amont (Oualia + Manantali -> Kayes) portera à la fois sur la détermination des causes de l'anomalie constatée, sur la possibilité d'estimer les apports intermédiaires, et sur la mise au point d'une procédure de correction en boucle fermée, qui devrait être très efficace compte tenu des temps de transfert assez courts observés entre Manantali et Kayes. Cette procédure permettra de corriger en temps réel et en continu, les valeurs de débits à lâcher, en fonction des écarts constatés entre débits objectif et obtenu à Kayes, et des corrections effectuées les jours précédents sur les lâchés.

## 2.4.3 Débits obtenus à Bakel

Hormis les 1, 2, 3 et 8 septembre, le débit obtenu à Bakel (fig.2.4.3.1) est supérieur à l'objectif fixé pendant toute la période du soutien de crue. L'excédent de débit obtenu par rapport à l'objectif est dû essentiellement à l'anomalie constatée sur le modèle de propagation amont. Toutefois, le modèle aval (Kayes + Gourbassy  $\Rightarrow$  Bakel) sous-estime également, à quelques reprises, le débit à Bakel.

Un calage insatisfaisant du modèle de prévision par autorégression des débits à Gourbassy (corrigé dès le 3 septembre), est à l'origine des débits inadéquats obtenus entre le 1<sup>er</sup> et le 7 septembre à Bakel. Ce modèle surestimait en effet les débits prévus à Gourbassy, ce qui a entraîné une sous-estimation des lâchés nécessaires calculés par PROGEMAN, à l'origine du débit trop faible obtenu 1<sup>er</sup> au 3 septembre à Bakel. Constatant ce déficit de débit, et craignant de ne pas atteindre le palier de 2500 m<sup>3</sup>/s souhaité à Bakel, le gestionnaire du barrage a majoré les valeurs de lâchés calculées par PROGEMAN du 2 au 4 septembre. Du fait que l'origine des erreurs avait été supprimée entre temps (3 septembre), cette majoration explique en partie l'excès de débit constaté du 4 au 7 septembre à Bakel.

L'application systématique d'une correction en boucle fermée (voir annexe 2-B) à partir du 18 septembre, a permis de diminuer l'excédent de débit obtenu à Bakel, et donc d'économiser de l'eau dans la retenue. Compte tenu des temps de transfert relativement longs entre Manantali et Bakel, et du manque de recul permettant de mener une étude spécifique sur le sujet, on ne pouvait se permettre d'appliquer une correction trop sévère, qui aurait fait courir un risque d'oscillation dans les calculs. C'est pourquoi l'algorithme de calcul retenu pour les corrections n'a fait que diminuer l'excédent de débit sans parvenir à l'annuler.

Entre le 28 août et le 11 octobre, période pendant laquelle le débit objectif était supérieur à 500 m<sup>3</sup>/s, le volume écoulé à Bakel s'élève à 7.11 Gm<sup>3</sup>, pour un volume prévu de 6.59 à partir des débits observés à Kayes et Gourbassy, et un volume objectif de 6,27 Gm<sup>3</sup>. Pour l'ensemble de l'hydrogramme objectif, entre le 26 août et le 20 octobre, ces mêmes volumes s'élèvent respectivement à 7.69 Gm<sup>3</sup>, 7.00 Gm<sup>3</sup> et 6.48 Gm<sup>3</sup>.

Alors que vers le 30 octobre le débit observé à Bakel passait en dessous de 200 m<sup>3</sup>/s, on observe depuis lors sur cette station un débit systématiquement plus faible d'environ 25 m<sup>3</sup>/s par rapport au débit prévu à partir des valeurs observées à Kayes et Gourbassy. Cette anomalie est analysée plus bas.

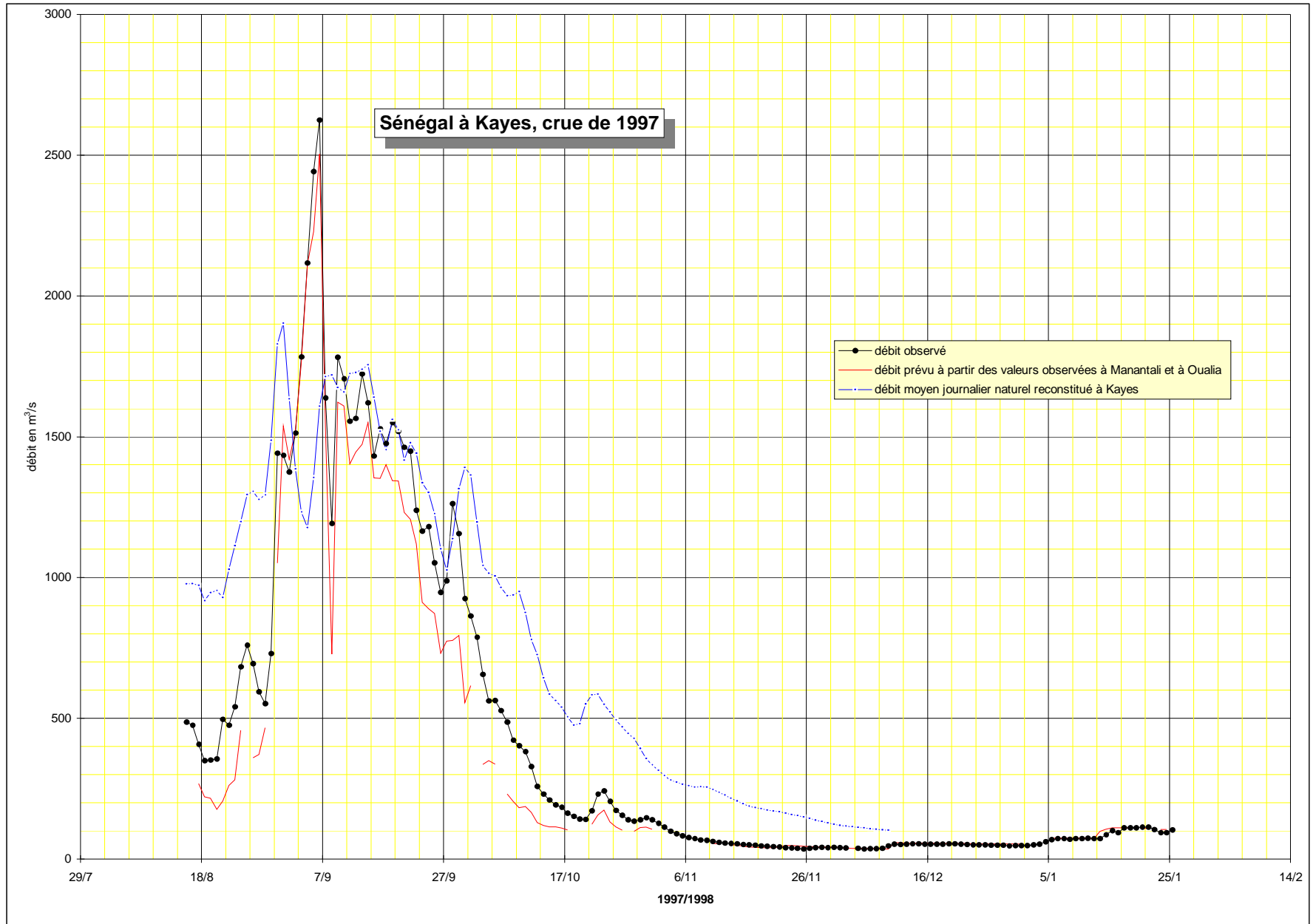


Figure 2.4.2.1 : débit du Sénégal à Kayes pendant la crue de 1997

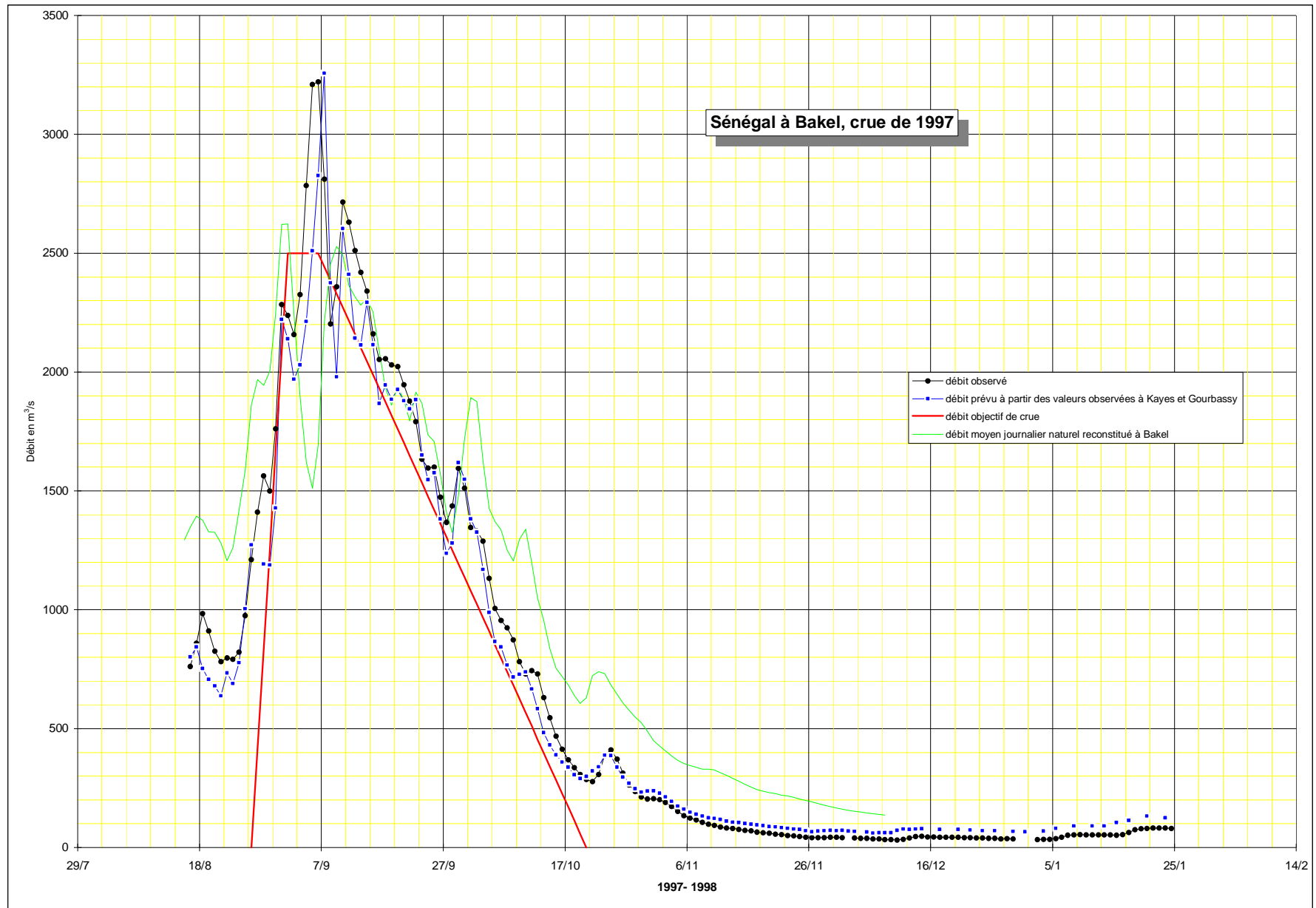


Figure 2.4.3.1 : débit du Sénégal à Bakel pendant la crue de 1997

#### 2.4.4 Débits observés à Oualia

Le volume écoulé dans le Bakoye à Oualia (fig. 2.4.4.1) entre le 15 août et le 15 octobre 1997 s'élève à  $1.63 \text{ Gm}^3$ . Comparé aux valeurs obtenues les autres années sur la même période, classées par ordre croissant, ce volume se situe entre les rangs 18 et 19 sur les 41 valeurs de la période 1954-1994, et entre les rangs 18 et 19 sur les 25 valeurs de la période 1970-1994. Le volume écoulé dans le Bakoye en 1997 présente donc une valeur proche de la médiane par rapport à la période 1954-1994, et proche de la quadriennale humide par rapport à la période 1970-1994.

Comme le montre la figure 2.4.4.1, la prévision des débits à l'horizon 2 jours par autorégression est de qualité assez médiocre. La variabilité très rapide du régime du Bakoye ne permet à ce genre de modèle que de faire une prévision très prudente, assez peu différente de celle qui consisterait à dire : le débit prévu dans deux jours est égal à celui d'aujourd'hui. Comme pour les autres stations contrôlant les débits naturels du haut bassin, il est prévu toutefois pour 1998 de chercher une amélioration des modèles autorégressifs, en testant des schémas moins simplistes que ceux qui ont été utilisés en 1997 (voir annexe 2-A).

#### 2.4.5 Débits observés à Gourbassy

Le volume écoulé dans la Falémé à Gourbassy (fig.2.4.5.1) entre le 15 août et le 15 octobre 1997 s'élève à  $1,84 \text{ Gm}^3$ . Comparé aux valeurs obtenues les autres années sur la même période, classées par ordre croissant, ce volume se situe entre les rangs 20 et 21 sur les 41 valeurs de la période 1954-1994, et entre les rangs 19 et 20 sur les 25 valeurs de la période 1970-1994. Comme pour le Bakoye, le volume écoulé dans la Falémé en 1997 présente donc une valeur proche de la médiane par rapport à la période 1954-1994, et proche de la quadriennale humide par rapport à la période 1970-1994.

En ce qui concerne les prévisions de débit par autorégression, on peut faire les mêmes commentaires que pour Oualia. On remarque en outre sur la figure 2.4.5.1, que les valeurs prévues à l'horizon 2 jours sont mauvaises avant le 6 septembre, du fait du calage insatisfaisant utilisé pour le modèle jusque dans la journée du 3 septembre.

#### 2.4.6 Remplissage du réservoir de Manantali

Pendant toute la durée du soutien de crue, la possibilité d'atteindre l'objectif de cote fixé pour le 30/6/98 a été régulièrement évaluée de façon statistique, à l'aide d'une procédure de calcul rajoutée au logiciel Simulsen (voir annexe 2-C). Ainsi, il apparaissait dès le mois d'août qu'on n'aurait qu'une chance sur cinq de dépasser la cote 192 m au 30/6/98, si le soutien de crue était suivi d'un soutien d'étiage à  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ . Cette probabilité devenait même inférieure à une chance sur 10 à partir du mois d'octobre. Par contre, la possibilité d'atteindre l'objectif de cote dans le cas d'un soutien à  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  pouvait être évaluée à une chance sur deux dès le mois d'août, puis supérieure à 9 chances sur 10 à partir d'octobre.

L'utilisation de la procédure statistique dont il est question ci-dessus, n'est plus justifiée dès lors que le régime de tarissement est bien établi (depuis mi-novembre). Il est alors possible de faire des prévisions de débit sur toute la durée de l'étiage sur le Bakoye, la Falémé et le Bafing en amont de Manantali, en utilisant un modèle de tarissement du type :

$$Q_{(j+n)} = Q_{(j)} * e^{-K*n}$$

où  $Q_{(j+n)}$  et  $Q_{(j)}$  représentent les débits aux jours  $j+n$  et  $j$ , et  $K$  le coefficient de tarissement.

Les valeurs obtenues pour  $K$  sont les suivantes :

- Bafing à Bafing Makana :  $K= 0.0190$ , période décembre à Mai entre 1961 et 1997
- Falémé à Gourbassy :  $K= 0.0226$ , période janvier à avril entre 1970 et 1997
- Bakoye à Oualia :  $K= 0.0282$ , période janvier à mai entre 1970 et 1997.

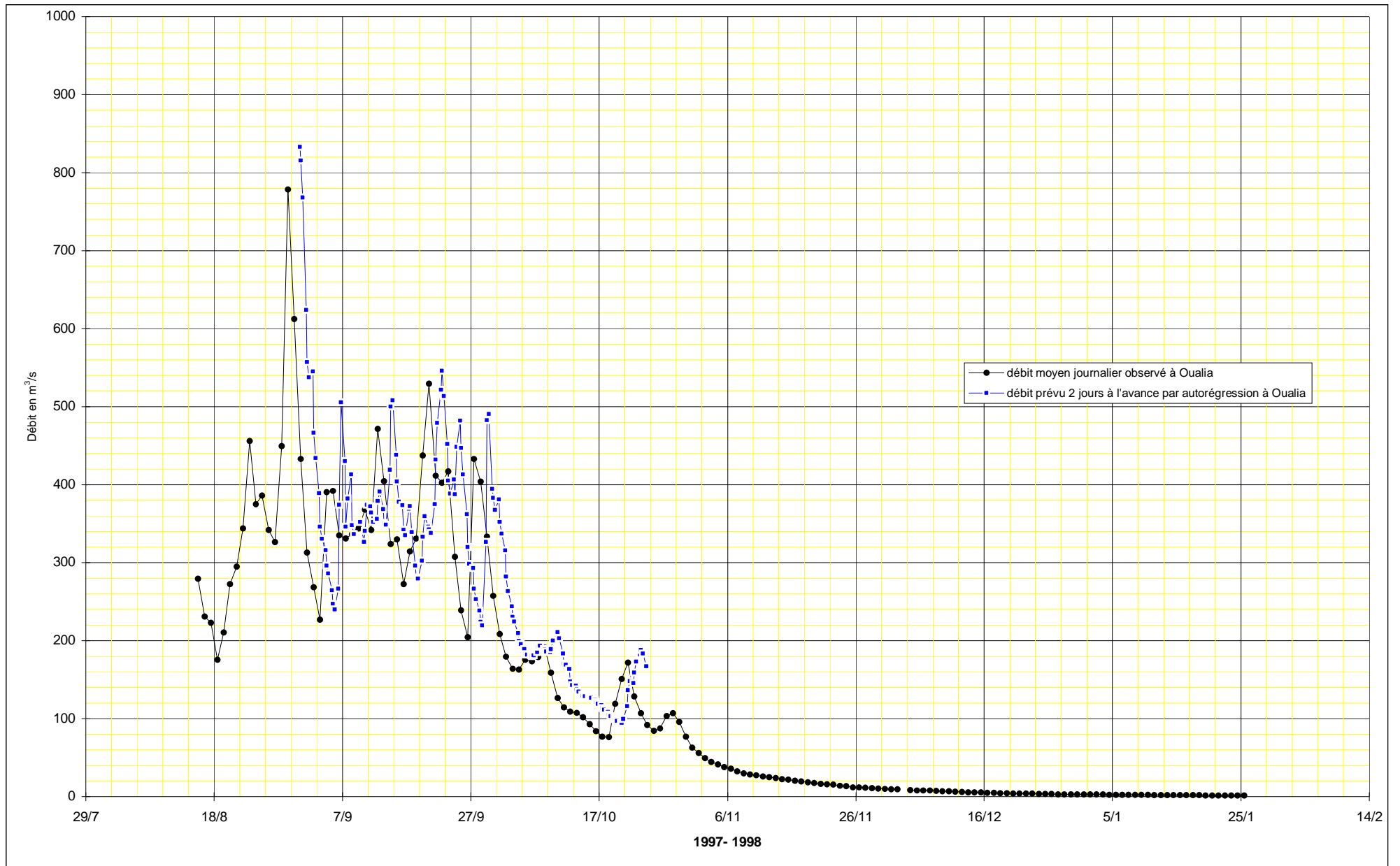


Figure 2.4.4.1 : débit observé sur le Bakoye à Oualia pendant la crue de 1997

Le modèle de tarissement est utilisé pour prévoir les débits des trois cours d'eau jusqu'au mois de juin 1998, en partant des valeurs suivantes : 80.3 m<sup>3</sup>/s le 7/12/97 à Makana ; 7.6 m<sup>3</sup>/s le 26.1.98 à Goubassy ; 1.4 m<sup>3</sup>/s le 25.1.98 à Oualia.

Les modèles de propagation calés sur les périodes 1993-1997 (amont) et 1987-1997 (aval) sont appliqués sur les débits ainsi prévus à Oualia et Goubassy, pour calculer la chronique de lâchés qui permettra d'obtenir le débit souhaité en étiage à Bakel jusqu'au 30.6.98.

Enfin, la chronique de lâchés combinée aux débits prévus à Makana, permet de calculer l'évolution du niveau du lac en tenant compte de valeurs moyennes mensuelles d'évaporation, à partir de la cote 199,49 m relevée le 26.1.98. On obtient alors une prévision de cote à 193.11m pour le lac de Manantali au 30/6/98.

#### 2.4.7 Bilans de volume

A partir des données disponibles, on a calculé un bilan de volume portant sur les écoulements du 1/09/97 au 7/12/97 à Bakel. Afin de pouvoir comparer les volumes écoulés aux différentes stations, on a tenu compte des temps de propagation moyens suivants :

2 jours entre Kayes + Goubassy et Bakel ; 1 jour entre Manantali + Oualia et Kayes ; 1 jour entre Makana et Manantali. Le bilan est donné dans le tableau 2.4.7.1, où les valeurs indiquées pour le régime naturel à Manantali, Kayes et Bakel sont reconstituées par modèle de propagation à partir des débits observés à Makana, Oualia et Goubassy.

station	Bafing à Makana	apports à Manantali	lâchers à Manantali	Bakoye à oualia	Falémé à Goubassy	Sénégal à Kayes		Sénégal à Bakel	
type	observé	naturel	observé	observé	observé	observé	naturel	observé	naturel
période	28.8 - 3.12	29.8 - 4.12	29.8 - 4.12	29.8 - 4.12	30.8 - 5.12	30.8 - 5.12	30.8 - 5.12	1.9 - 7.12	1.9 - 7.12
volume (Mm <sup>3</sup> )	4165	4758	2539	1462	1615	5124	6543	7367	8440

Tableau 2.4.7.1 : bilan de volume écoulé à Bakel entre le 1/09/97 et le 7/12/97

La différence de volume entre apports naturels à Manantali et lâchés effectués, soit 2 219 Mm<sup>3</sup>, est à comparer au gain de volume enregistré dans la retenue entre le 29/08/97 et le 5/12/97, soit 1 475 Mm<sup>3</sup>. Le gros écart constaté entre les deux chiffres (744 Mm<sup>3</sup> soit 88 m<sup>3</sup>/s pendant 98 jours) a trois origines possibles :

- Les pertes par évaporation sur la retenue, qui de toute façon ne doivent pas excéder un ordre de grandeur de 100 Mm<sup>3</sup> sur la période.
- Une surestimation possible des apports naturels à Manantali, évalués par modèle de propagation (calé sur la période 1966-1984) à partir des débits de Makana.
- Une sous-estimation des lâchés effectués à Manantali. On verra plus bas que cette hypothèse est assez probable.

La différence de volume entre régime naturel et régime observé s'élève à 1 419 Mm<sup>3</sup> à Kayes, et à 1 073 Mm<sup>3</sup> à Bakel. La valeur obtenue à Kayes est très proche des 1475 stockés dans la retenue sur la même période, et peut donc être tenue pour correcte. Celle de Bakel est certainement un peu faible, puisqu'elle devrait avoir théoriquement le même ordre de grandeur que celle de Kayes. La différence constatée de 346 Mm<sup>3</sup> (1419 – 1073) équivaut à un débit de 41 m<sup>3</sup>/s pendant 98 jours. Elle provient probablement du fait que (voir plus loin) la propagation des débits de hautes eaux semble être actuellement différente de celle qu'on observait en moyenne sur la période 1955-1985, et qui a servi à calculer les débits naturels de Bakel à partir de ceux de Kayes.



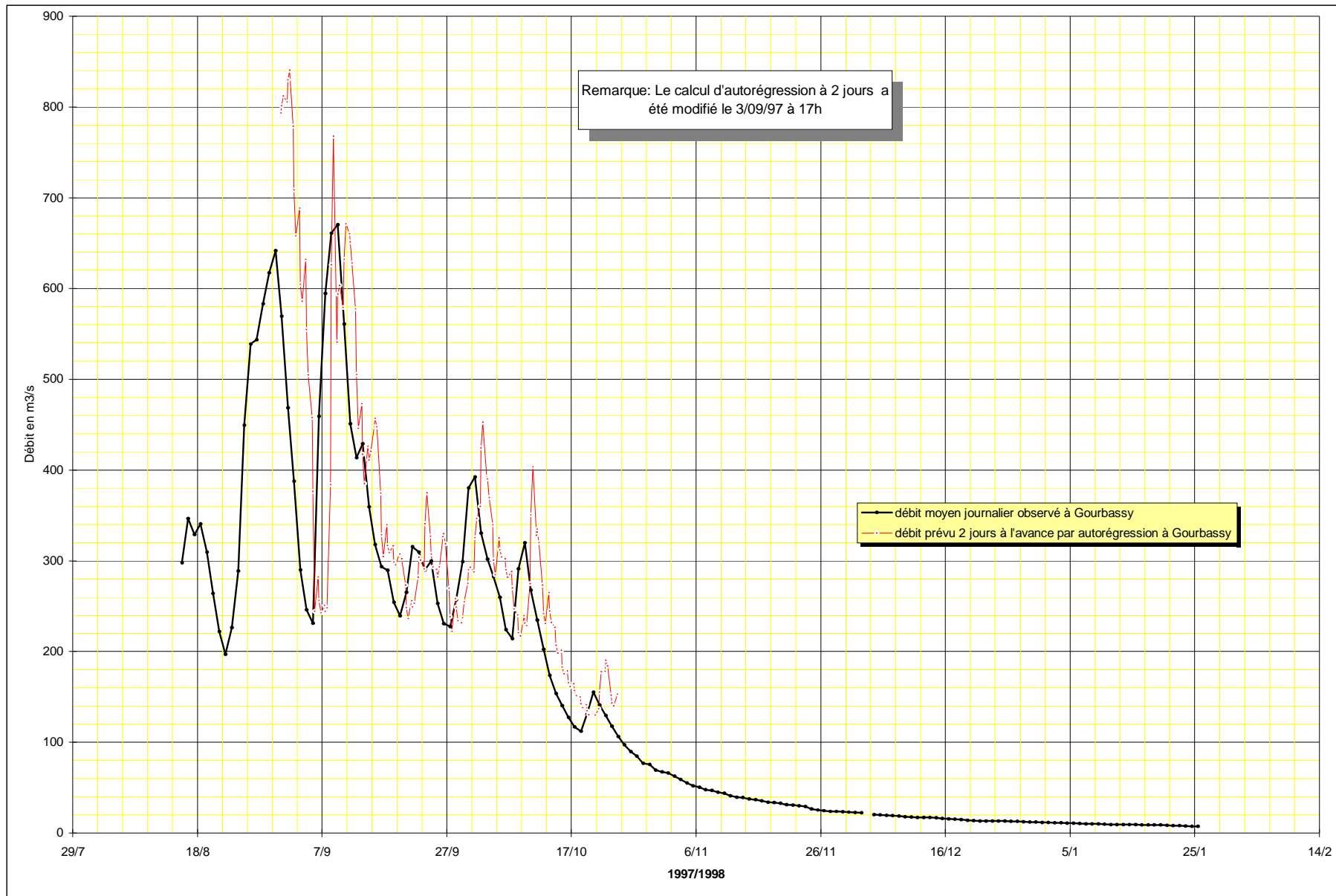


Figure 2.4.5.1 : Débit observé sur la Falémé à Gourbassy pendant la crue 1997/1998

Toujours sur la période qui nous intéresse, les apports intermédiaires entre Oualia, Manantali et Kayes peuvent être estimés à 323 Mm<sup>3</sup> en régime naturel et 1123 Mm<sup>3</sup> en régime observé. Ce dernier chiffre représente 17% du volume naturel théorique écoulé à Kayes et semble visiblement trop élevé compte tenu du fait que le bassin intermédiaire entre les trois stations se trouve sur une partie du bassin peu arrosée, qui ne représente qu'environ 30% de sa superficie totale au niveau de Kayes. Ici encore, on peut soupçonner une sous-estimation des lâchés effectués à Manantali.

Entre les stations de Kayes, Gourbassy et Bakel, les apports intermédiaires peuvent être estimés à 282 Mm<sup>3</sup> en régime naturel, et 628 Mm<sup>3</sup> en régime observé. La différence entre ces deux valeurs pourrait s'expliquer par la modification du régime de propagation de hautes eaux dont il est question plus bas.

## **2.5 Analyse des problèmes rencontrés**

### **2.5.1 Recherche des causes possibles de l'excès de débit constaté à Kayes**

Les causes de cette anomalie affectant la plage de débit 80-1800 m<sup>3</sup>/s à Kayes, sont à rechercher parmi les possibilités suivantes:

- Déatarage de la station de Kayes: très peu probable, car le modèle de propagation donnant les débits à Bakel en fonction de Kayes et Gourbassy devrait alors présenter l'anomalie inverse sur la même plage de débit. Or le manque d'eau constaté à Bakel n'affecte que des débits compris entre 200 et 30 m<sup>3</sup>/s, ce qui ne permet d'envisager un déatarage éventuel à Kayes qu'en basses eaux. Celui-ci n'expliquerait donc qu'en basses eaux l'anomalie constatée à Kayes, pour laquelle une autre explication devrait être trouvée pour les moyennes eaux. Il est probable qu'une unique cause est à l'origine de l'excès d'eau observé, ce qui nous fait abandonner l'hypothèse d'un déatarage à Kayes.
- Déatarage de la station de Oualia: peu probable, car l'importance de l'anomalie constatée supposerait un déatarage très important à Oualia.
- Mauvais tarage de la station de Soukoutali (1966-1984) qui a servi à caler le modèle de propagation: très peu probable, compte tenu de l'excellente qualité des mesures effectuées à cette station.
- Sous-estimation des débits lâchés à Manantali: il sera nécessaire de vérifier l'étalonnage des vannes en 1998.
- Pertes d'eau au niveau de la retenue, restituées à l'aval dans le Bafing : l'ordre de grandeur de l'anomalie en question écarte complètement la possibilité de pertes par écoulement souterrain qui devraient par ailleurs s'observer en permanence, alors que l'anomalie disparaît pour des débits inférieurs à 80 m<sup>3</sup>/s. Seules des pertes au niveau des organes d'évacuation de l'ouvrage pourraient être envisagées, ce qui revient au problème de leur étalonnage, posé plus haut.
- Apports intermédiaires exceptionnellement élevés entre Manantali, Oualia et Kayes en 1997
- Problème de calage du modèle de propagation amont

L'envoi de données hydrologiques récentes de la part du gestionnaire de Manantali, concernant les stations du haut bassin et surtout les lâchés effectués depuis 1987, nous a permis de vérifier le calage du modèle de propagation amont (Oualia + Manantali -> Kayes). Les résultats de cette étude présentés dans l'annexe 2-D, montrent que les paramètres du modèle se calent de façons très différentes sur les périodes 1967-1983 d'une part, et 1987-1997 d'autre part. Tout particulièrement pour des débits à Kayes situés entre 400 m<sup>3</sup>/s et 1100 m<sup>3</sup>/s, la différence de calage du modèle se situe entre 200 m<sup>3</sup>/s et 300 m<sup>3</sup>/s entre les deux périodes, ce qui correspond à l'ordre de grandeur de l'excès de débit remarqué en 1997. L'anomalie constatée existe donc en fait depuis 1987.

Les données de débit antérieures à 1984 proviennent de la station de Soukoutali, anciennement située au droit du barrage. Elles sont a priori très fiables car Soukoutali était une très bonne station, parfaitement étalonnée. Le calage des paramètres sur la période 1967-1983 est très proche de celui effectué sur la période 1967-1971, qui est utilisé dans PROGEMAN. Les données de débit postérieures à 1986 ont été, quant à elles, calculées à Manantali à l'aide d'un logiciel qui prend en compte le niveau du lac et l'ouverture des vannes, en utilisant l'étalonnage de ces dernières.

La concomitance du début de l'anomalie avec la mise en service du barrage, ainsi que les remarques qui précèdent, nous incitent à ne retenir que deux explications possibles :

- Soit la présence la retenue, immense étendue d'eau, a entraîné une modification sensible du climat local, avec une pluviosité accrue à l'origine d'apports plus importants entre Manantali et Kayes.
- Soit l'étalonnage des vannes du barrage est inexact, indiquant une valeur de débit plus faible que la valeur réellement lâchée.
- La nécessité s'impose donc de vérifier l'étalonnage des vannes du barrage. L'idéal serait d'effectuer juste à l'aval de l'ouvrage, des séries de mesure de débit couvrant une large gamme de lâchés, pour au moins deux conditions bien distinctes de remplissage du lac. Ceci suppose deux campagnes de jaugeages suffisamment espacées en temps.

### **2.5.2 Recherche des causes possibles du manque d'eau constaté à Bakel depuis début novembre 1997**

Les causes de l'anomalie sont à rechercher parmi les possibilités suivantes :

- Détarage de la station de Gourbassy en basses eaux : peu probable, car seul un détarage très sévère pourrait expliquer l'importance du manque d'eau constaté à Bakel. Par ailleurs, ce détarage correspondrait à un rehaussement (d'environ 30 cm) du seuil de contrôle de Gourbassy en 1997 par rapport à la période 1955-1985 sur laquelle est calée le modèle aval. Rien ne nous permet de corroborer cette hypothèse, puisqu'au contraire si l'on examine sur la période 1966-1993 la correspondance des cotes sur la Falémé entre Fadougou, situé à l'amont, et Gourbassy, on constate qu'à partir de 1986, la cote obtenue à Gourbassy est plus faible qu'avant pour une même cote à Fadougou.
- Détarage de la station de Kayes en basses eaux : peu probable, d'après les éléments indiqués plus haut.
- Détarage de la station de Bakel en basses eaux.
- Modification des conditions de propagation de débit de basses eaux.

Comme pour le modèle amont, nous avons vérifié le calage du modèle aval en utilisant toutes les données à notre disposition. L'étalonnage de Bakel a également été vérifié par la même occasion. Les résultats de cette étude, présentée en annexe 2-E, montrent que l'hypothèse la plus probable concerne une modification des conditions de propagation des débits de basses eaux, depuis la mise en place d'un soutien d'étiage important. Celle-ci serait due au fait que le maintien d'un débit assez fort pendant l'étiage relève artificiellement la cote dans le lit mineur du fleuve au point d'entraîner des pertes non négligeables vers la nappe.

On relève incidemment dans cette même étude, que la propagation des débits de hautes eaux semble elle aussi avoir subi une modification, mais cette fois dans le sens inverse. Un même débit à Kayes et Gourbassy se traduit par un débit plus fort à Bakel après 1972 qu'avant 1972. Cette constatation est assez délicate à interpréter car cette date coïncide avec un détarage de la station de Bakel. Cependant, cette tendance à l'augmentation du débit aval en hautes eaux semble s'accroître dans les années récentes. On peut donc avancer l'hypothèse d'une réelle modification des conditions de propagation de hautes eaux, qui pourrait être due à la dégradation de la végétation de berge, ou bien à la forme plus pointue des crues récentes.

Tant en basses eaux qu'en hautes eaux, il apparaît donc nécessaire d'effectuer des mesures de débit sur le Sénégal à Bakel, afin de vérifier l'étalonnage de cette station pour pouvoir confirmer - ou infirmer - les hypothèses avancées ci-dessus.

### 2.5.3 Contrôle des débits – Mission de terrain du 18 au 21 mars 1998

Afin de contrôler les débits permanents sur le bief Bakel – Richard Toll, une mission conjointe ORSTOM – Direction régionale de l'Hydraulique de Saint Louis s'est rendue à Bakel le 19 mars afin de mesurer les débits du fleuve.

Malheureusement les délais étant très courts avant la publication du rapport provisoire, il n'a pas été possible d'informer par la voie officielle toutes les préfectures sur chaque rive du fleuve, et quelques difficultés sont apparues : il n'a pas été possible de jauger à Bakel et Kaédi, ainsi qu'à Podor et Richard Toll.

Des mesures ont été effectuées à quelques stations :

Date	Station	Cours d'eau	Cote échelle (cm)	Débit (m <sup>3</sup> /s)
19/03/1998	Matam	Sénégal	90	122
19/03/1998	Bakel	Sénégal	162	124 <sup>1</sup>
20/03/1998	N'Dioum <sup>2</sup>	Doué	352	52.8
21/03/1998	Aval ouvrage CSS	Taouhey	194	48.4

Ces mesures sont très intéressantes, elles semblent prouver que la crainte d'avoir des pertes non prévues n'est pas fondées. Le report de ces résultats sur les courbes d'étalonnages de Matam et Bakel permet de constater qu'il ne semble pas y avoir de changement d'équilibre dans le régime permanent qui a été mesuré (la hauteur à Bakel était quasi constante depuis 20 jours au moment de la mesure).

La figure 2.5.3.1 montre la position de la mesure effectuée à Matam sur la courbe de tarage de basses eaux à cette station .

L'évaluation de l'évaporation sur le bief Bakel Matam est effectuée en prenant comme base un plan d'eau de 25.8 km<sup>2</sup> avec une évaporation quotidienne de 8 mm sur plan d'eau libre, ce qui correspond à 2.4 m<sup>3</sup>/s. Le débit estimé à Bakel serait donc de 124 m<sup>3</sup>/s pour une hauteur à l'échelle de 162 cm. Ces valeurs sont reportées sur la figure 2.5.3.2 qui représente les variations du plan d'eau à Bakel depuis le 15 octobre.

Le report de la mesure reconstituée à Bakel sur la courbe d'étalonnage utilisée depuis 1973 n'attire pas de commentaire particulier, si ce n'est qu'en cas de confirmation par les mesures à venir, il sera bon de modifier la courbe d'étalonnage, les valeurs des débits en basses eaux paraissant un peu forts par rapport à cette courbe. La figure 2.5.3.3 montre la position de la mesure de Matam modifiée par rapport à la courbe d'étalonnage.

Il est probable que l'étalonnage de basses eaux devra être revu, les mesures effectuées depuis 1984 conduisent à tracer une courbe de basses eaux au dessus de l'ancienne courbe d'étalonnage qui était utilisée depuis 1973.

<sup>1</sup> Le débit à Bakel est obtenu en tenant compte des pertes par évaporation sur le bief Bakel – Matam, soit 2.4 m<sup>3</sup>/s.

<sup>2</sup> Il n'y a pas de station à N'Dioum, le débit est affecté à Guédé Chantier relativement proche.

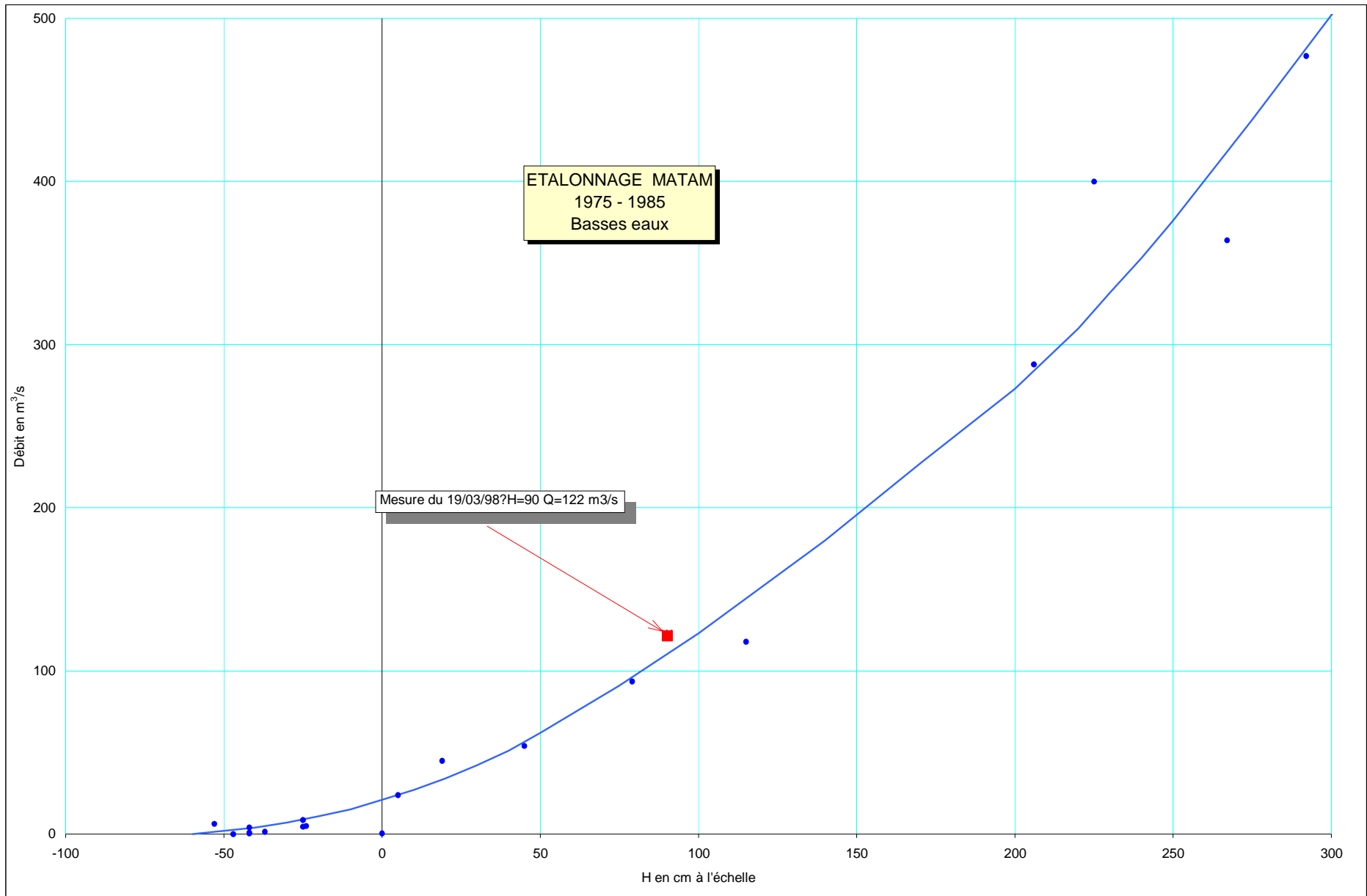


Figure 2.5.3.1

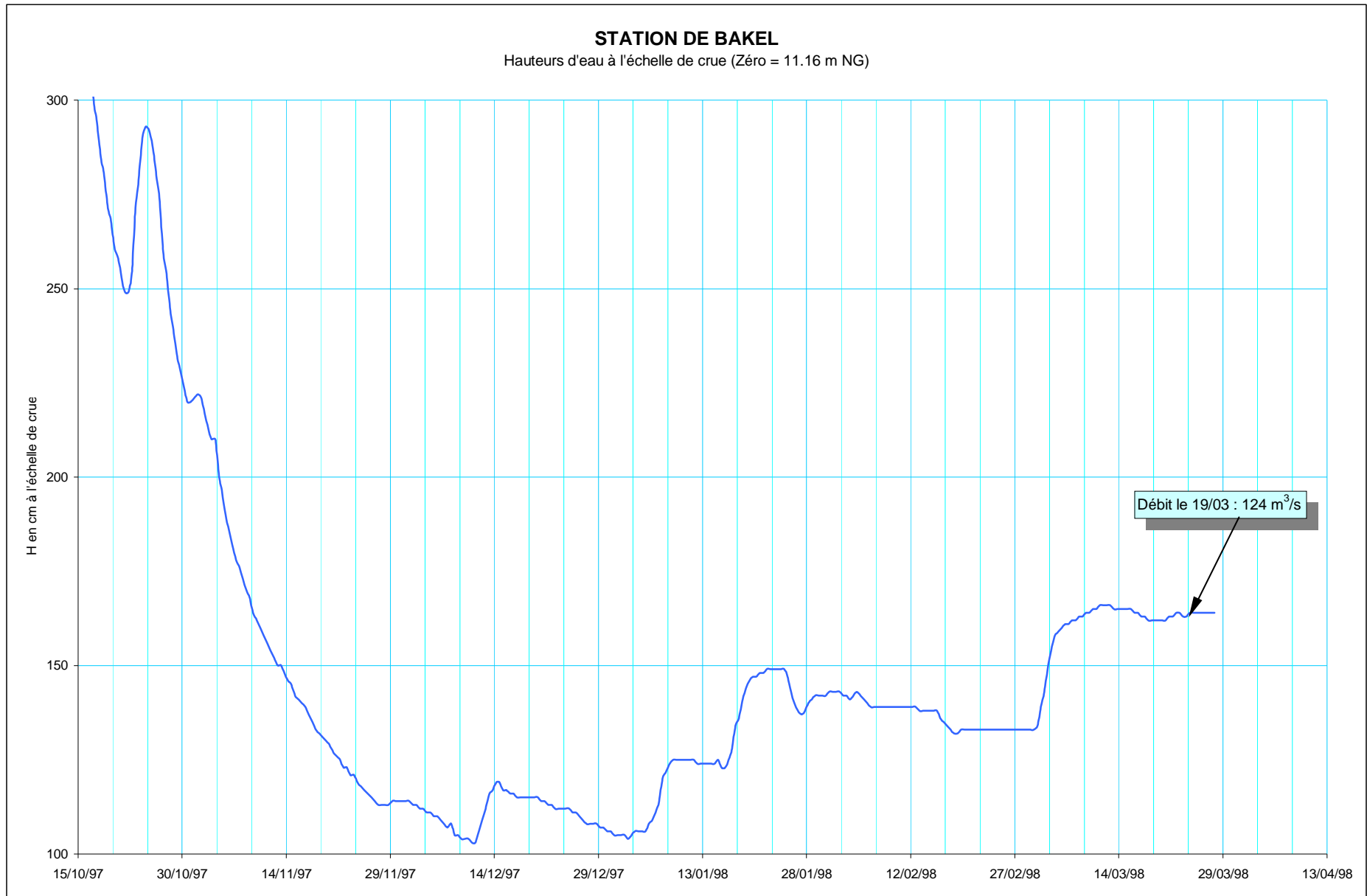


Figure 2.5.3.2

BAKEL - Sénégal  
Courbe de tarage - Période postérieure à 1973

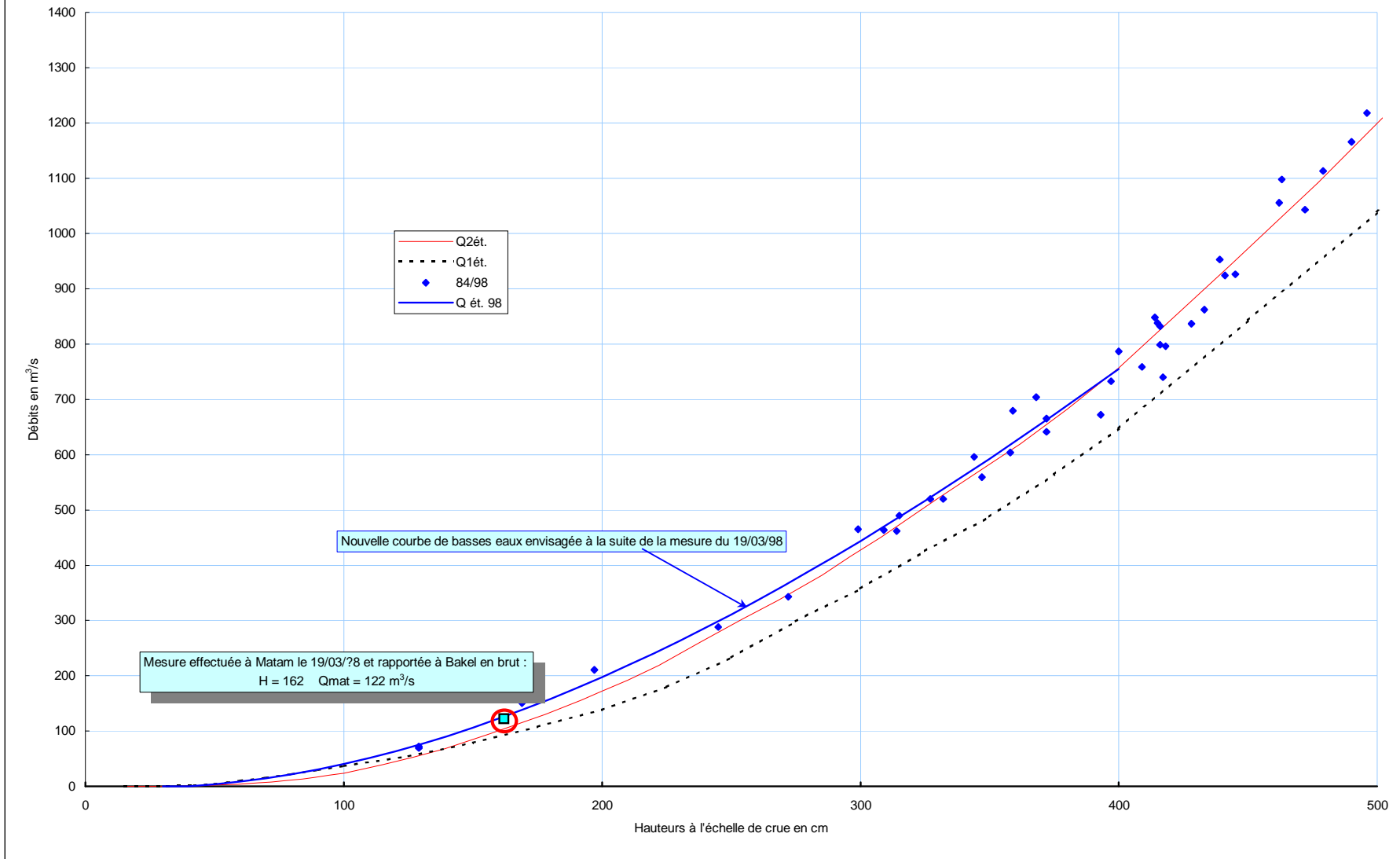


Figure 2.5.3.3

### **3. IMPACT DE LA CRUE 1997 SUR LE REMPLISSAGE DES CUVETTES DANS LA ZONE DE PODOR - MATAM**

Dans le cadre de « l'étude d'optimisation de la gestion des barrages de Manantali et de Diama », menée par l'ORSTOM et financée par le FAC, l'année 1997 devait permettre de suivre et analyser la propagation de la crue et de quantifier les superficies inondées. A cet effet il était prévu dans certaines cuvettes :

de mesurer le niveau de l'eau en fonction du niveau dans le fleuve ou dans le défluent les alimentant, et de relier ces niveaux aux superficies en eau des cuvettes au moyen d'une cartographie au GPS réalisée régulièrement.

Ce rapport décrit les activités menées depuis le mois de juillet dans ce domaine, et fait état des premiers résultats. A la mi-novembre, on peut considérer que le programme prévu a été mené à bien, grâce à de nombreuses missions sur le terrain et à une excellente collaboration de l'équipe ORSTOM avec :

- le SGPRES (Service de Gestion et de Planification des Ressources en Eau, Ministère de l'Hydraulique) représenté par la Brigade Hydrologique de Saint Louis.
- la SAED, et notamment les ingénieurs des délégations de PODOR et de MATAM.

A la date de la rédaction de rapport, sept missions de terrain conjointes ont déjà été effectuées, et une huitième mission est sur le départ.

#### **3.1. CALENDRIER DES MISSIONS ET TRAVAUX DE TERRAIN EFFECTUES**

##### **3.1.1. Mission ORSTOM – SAED des 9 et 10 juillet 97**

Cette mission a permis de procéder au choix des cuvettes devant faire l'objet d'un suivi détaillé des niveaux et des superficies inondées, afin de servir de vérité terrain pour les études d'extension à l'ensemble de la zone par télédétection. Lors de cette mission, six cuvettes ont été choisies :

- Cuvette de Nabadji sur le Diamel (échelles de Nabadji)
- Cuvette de M'Bakhna sur le Diamel (échelles de M'Bakhna)
- Cuvette de Pété N'Goui sur le Doué (échelles de Pété)
- Cuvette de Wawa sur le Gayo (échelles de Wawa et de Thiélaw)
- Cuvette de Donaye sur le Gayo (échelles de Donaye)
- Cuvette de Podor à la confluence du Doué et du Sénégal (échelles de N'Gawlé)

##### **3.1.2. Mission ORSTOM – HYDRAULIQUE – SAED du 19 au 23 août 97**

Cette mission a permis d'installer les échelles de crue des stations suivantes :

- Cuvette de Nabadji sur le Diamel
- Cuvette de M'Bakhna sur le Diamel
- Cuvette de Wawa sur le Gayo à Wawa
- Cuvette de Donaye sur le Gayo (élément haut)

Lors de cette mission, certaines échelles n'ont pu être installées à cause de la pluie qui interdisait l'accès aux plaines inondables détrempées.



### **3.1.3. Mission HYDRAULIQUE – SAED du 1er au 5 septembre 97**

Cette mission a permis de compléter les installations d'échelles de crue qui n'avaient pu être menées à bien lors de la mission précédente, et notamment :

- Cuvette de Pété N'Goui sur le Doué
- Cuvette de Donaye sur le Gayo (éléments bas)

Toujours pour cause de pluie, il n'a pas été possible lors de cette mission d'installer les échelles de la cuvette de Podor à N'Gawlé et du Gayo à Thiélaw.

### **3.1.4. Mission ORSTOM – HYDRAULIQUE – SAED du 13 au 19 Septembre 97**

Cette mission a permis de démarrer le suivi des cuvettes et de mettre au point la méthodologie de cartographie au GPS des surfaces inondées. Durant cette mission, les contours des cuvettes de Nabadji, M'Bakhna, Pété N'Goui et Donaye ont pu être levés. Différents problèmes d'implantation des échelles de crue ont par ailleurs été identifiés.

### **3.1.5. MISSION ORSTOM – HYDRAULIQUE – SAED DU 21 AU 30 SEPTEMBRE 97**

Cette mission a permis de lever au GPS les contours de l'ensemble des six cuvettes, de contrôler le travail des lecteurs d'échelles, et de compléter ou améliorer les implantations des échelles de crue, avec notamment :

- Implantation des échelles de la cuvette de Podor à N'Gawlé, enfin accessible.
- Implantation des échelles sur le Gayo à Thiélaw (cuvette de Wawa).
- Modification de l'emplacement des échelles de Donaye.
- Modification de l'emplacement des échelles de Wawa.
- Modification de l'emplacement des échelles de M'Bakhna.

### **3.1.6. MISSION ORSTOM – HYDRAULIQUE – SAED DU 10 AU 18 OCTOBRE 97**

Cette mission a permis de lever au GPS les contours de l'ensemble des six cuvettes, et de contrôler le travail des lecteurs d'échelles.

### **3.1.7. MISSION ORSTOM – HYDRAULIQUE – SAED DU 27 OCTOBRE AU 2 NOVEMBRE 97**

Cette mission a permis de lever au GPS les contours des trois cuvettes encore en eau (Nabadji, Pété N'Goui et Podor), de contrôler les observateurs, et de rattacher la presque totalité des échelles aux bornes installées à proximité (à l'exception de Wawa, inaccessible en véhicule), avant la mise en sommeil du dispositif pour la saison sèche.

## **3.2. PREMIERS RESULTATS DU SUIVI DES CUVETTES**

### **3.2.1. TYPOLOGIE DES CUVETTES**

Les six cuvettes avaient été choisies en fonction de critères de représentativité géographique et de typologie des cuvettes (cuvettes à une seule entrée - sortie, cuvette présentant une entrée et une sortie et cuvettes en série). Cette typologie était basée sur un classement sommaire réalisé dans les études des schémas hydrauliques du Diamel (SAED-BDPA, 1992) et de la région de Podor (SAED-BRL, 1997). L'examen des résultats obtenus durant le suivi permet en fait de proposer une classification légèrement différente :

- Cuvettes de type dépression (formant une mare résiduelle après la décrue), à une seule entrée et une sortie : Nabadji, M'Bakhna, Pété N'Goui
- Cuvette de type dépression (avec mare résiduelle), présentant plusieurs entrées - sorties : Podor (2 alimentations - vidanges à partir du Sénégal et 2 à partir du Doué)
- Cuvette constituant le lit majeur d'un fleuve ou défluent, sans présenter de dépression capable de garder l'eau après la décrue : Wawa.
- Cuvette intermédiaire entre les deux derniers types (pas de dépression, mais séparation du lit mineur du défluent par un bourrelet de berge percé en plusieurs endroits) : Donaye.

Les cuvettes présentant une dépression peuvent connaître un début de remplissage durant la saison des pluies par les eaux de ruissellement. Le fond de ces cuvettes reste en eau nettement plus longtemps que pour les cuvettes résultant du simple débordement d'un lit mineur.

### **3.2.2. EVALUATION DE LA CRUE 97**

Une enquête sommaire auprès des agents de la SAED et des riverains des cuvettes révèle que la crue 97 est globalement perçue comme satisfaisante du point de vue des surfaces inondées. Bien meilleure que la crue 96 qui n'avait pratiquement pas provoqué d'inondation, la crue 97 reste toutefois nettement inférieure à la crue 95 qui reste chez de nombreux agriculteurs une crue très favorable ayant fortement marqué les esprits. Dans la région de Matam, la crue est généralement perçue comme ayant été trop brève pour inonder de manière efficace les cuvettes de la zone.

Les six cuvettes suivies durant la crue se sont assez bien remplies à l'exception de M'Bakhna qui n'a presque pas reçu d'inondation. On trouvera au tableau suivant les premiers résultats concernant les surfaces inondées à différents stades de remplissage.

## **3.3. CONCLUSION**

Les surfaces totales inondées dans les cuvettes sélectionnées ont représenté au maximum de la crue une surface de 3500 hectares environ. La somme des périmètres des cuvettes levés au GPS lors des différentes tournées représente un total de 382 kilomètres. Compte tenu des parcours de liaison, c'est donc un total de 500 km environ qui a été parcouru à pied, souvent dans la boue.

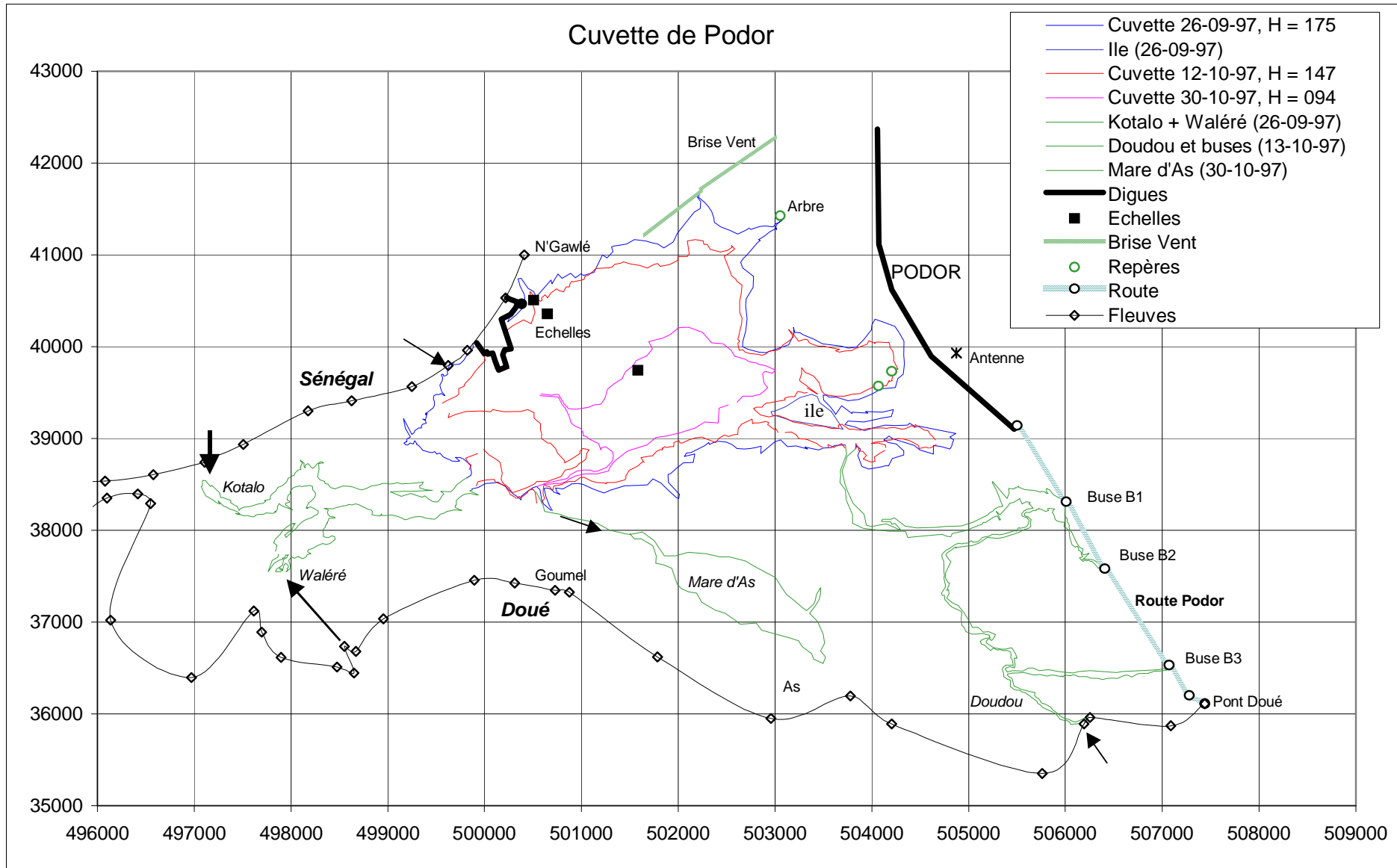
Le remplissage et la vidange des cuvettes durant la crue 97 ont donc dans l'ensemble été bien suivis. Il reste maintenant à évaluer les superficies semées et récoltées en cultures de décrue, ce sera l'objet du travail des prochains mois. Enfin il s'avère maintenant nécessaire afin de mieux interpréter les résultats obtenus de procéder au rattachement au nivellement général des échelles de crue installées dans les six cuvettes. Ce travail sera en principe réalisé prochainement par la SAED.

Premiers résultats du suivi des cuvettes :

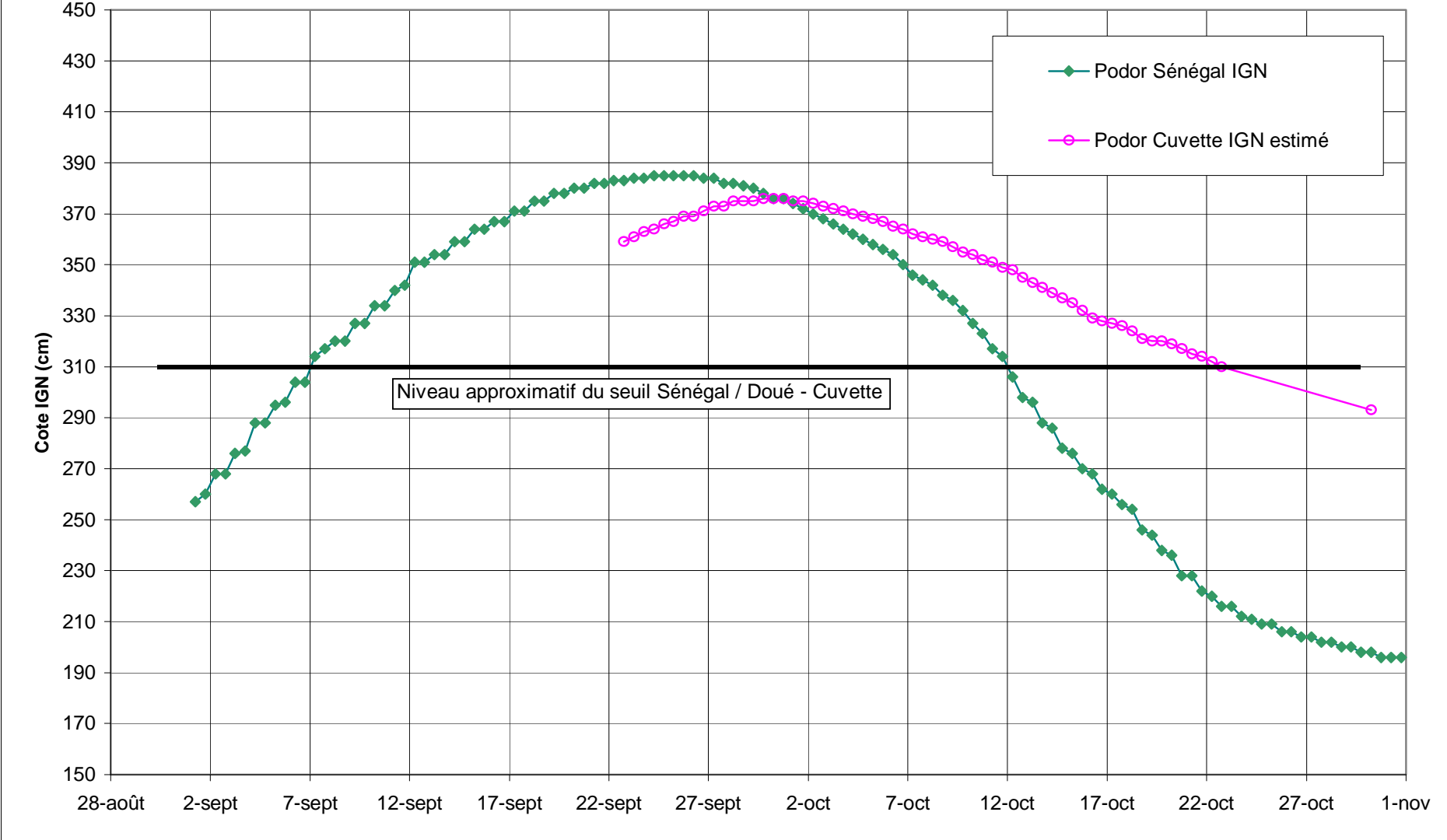
Cuvette	Date	Cote (cm)	Surface (km <sup>2</sup> )	Périmètre (km)	Commentaires
PODOR	26/09/97	175	8.74	27.23	
	12/10/97	147	6.03	22.05	
	30/10/97	94	1.52	8.42	
	26/09/97	175	0.79	13.50	Kotalo et Waléré
	13/10/97	147	0.53	22.86	Doudou
	30/10/97	94	0.87	6.09	Mare d'As
DONAYE	17/09/97	(216)	1.30	15.99	
	28/09/97	230	1.72	16.02	
	14/10/97	(110)	0.06	3.66	
WAWA	24/09/97	292	18.37	52.79	
	10/10/97	234	13.50	48.68	
	01/11/97	-50	0.50	10.00	
PETE N'GOUI	16/09/97	34	3.46	26.46	
	30/09/97	36	3.26	22.62	
	16/10/97	14	1.75	21.75	
	29/10/97	6	1.20	16.13	
M'BAKHNA	14/09/97	> 225	0.59	6.04	
	29/09/97	225	0.30	2.62	
	15/10/97	(215)	0.14	3.80	
	28/10/97	204	0.05	1.78	
NABADJI	15/09/97	314	1.91	12.15	
	29/09/97	221	0.94	9.17	
	15/10/97	157	0.61	7.18	
	28/10/97	150	0.58	5.27	

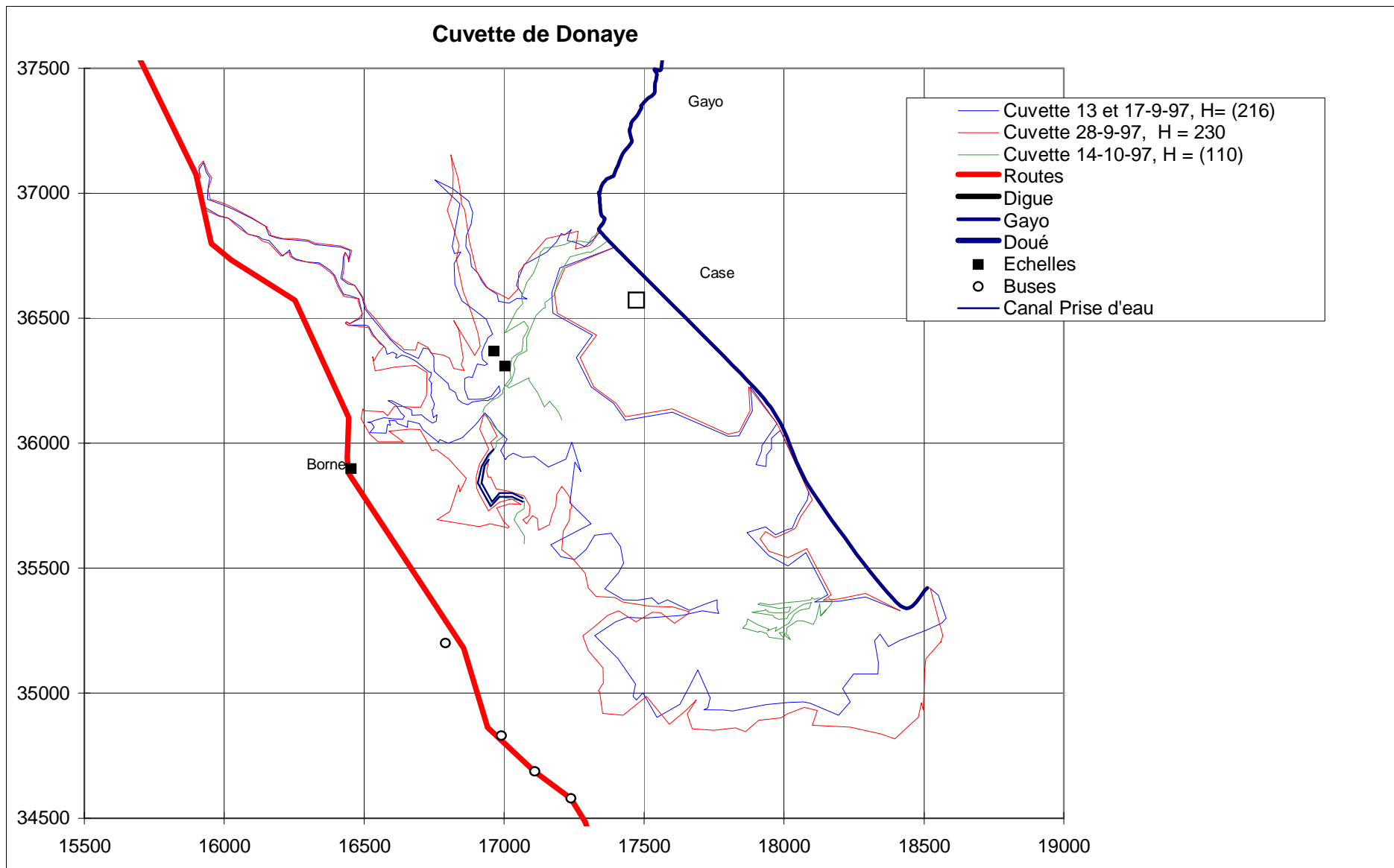


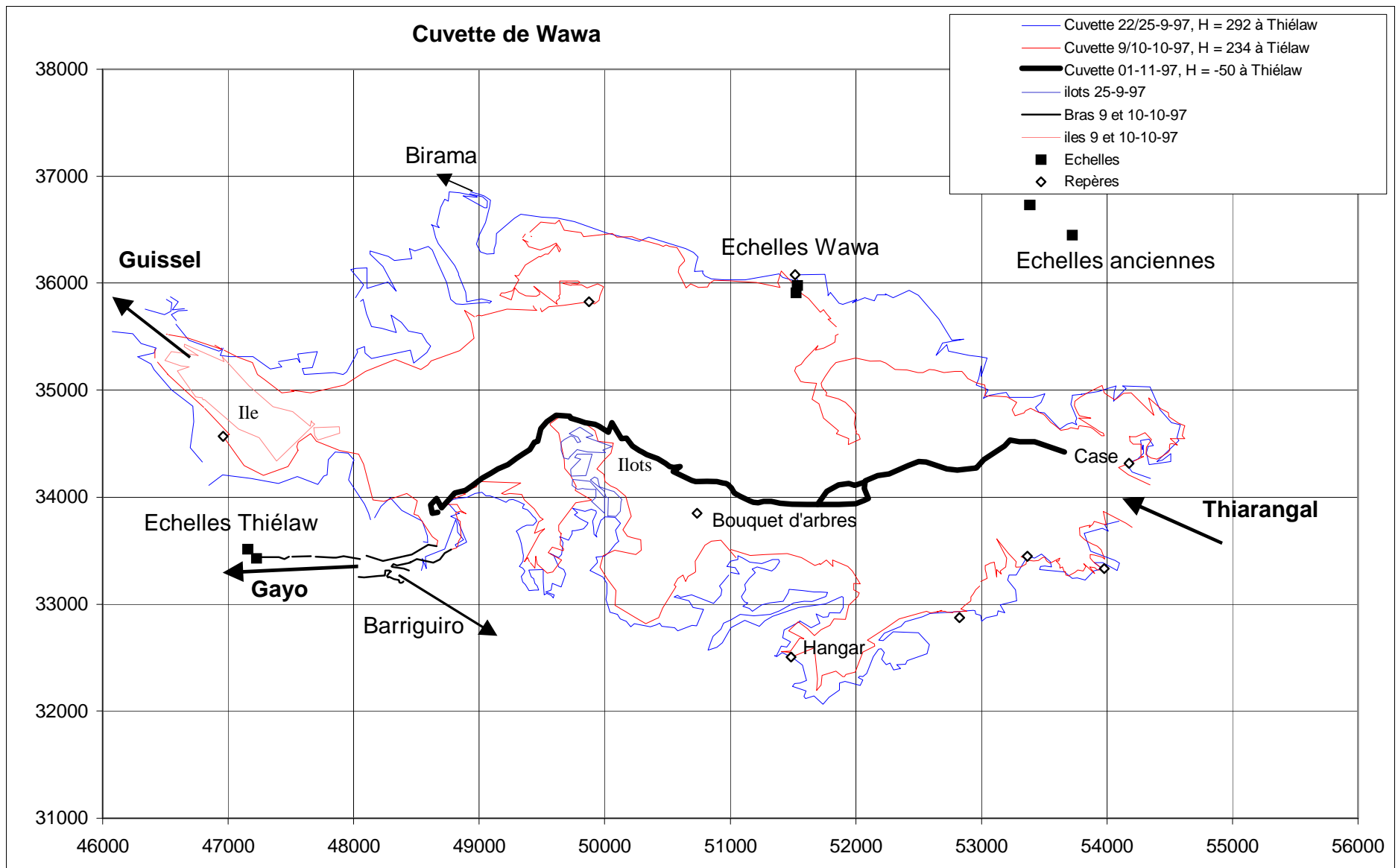
# Cuvette de Podor



### Cuvette de Podor, crue 97

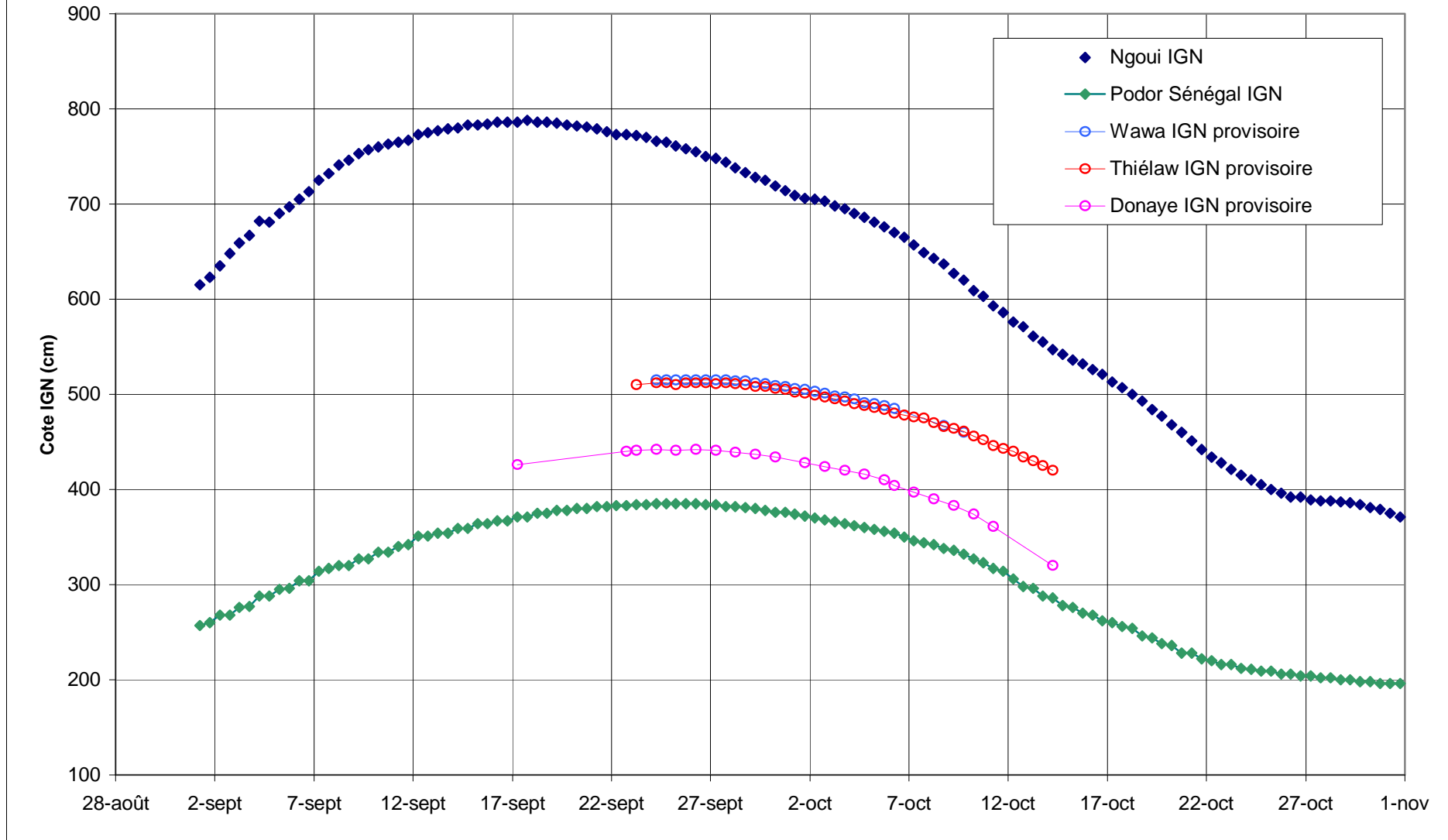


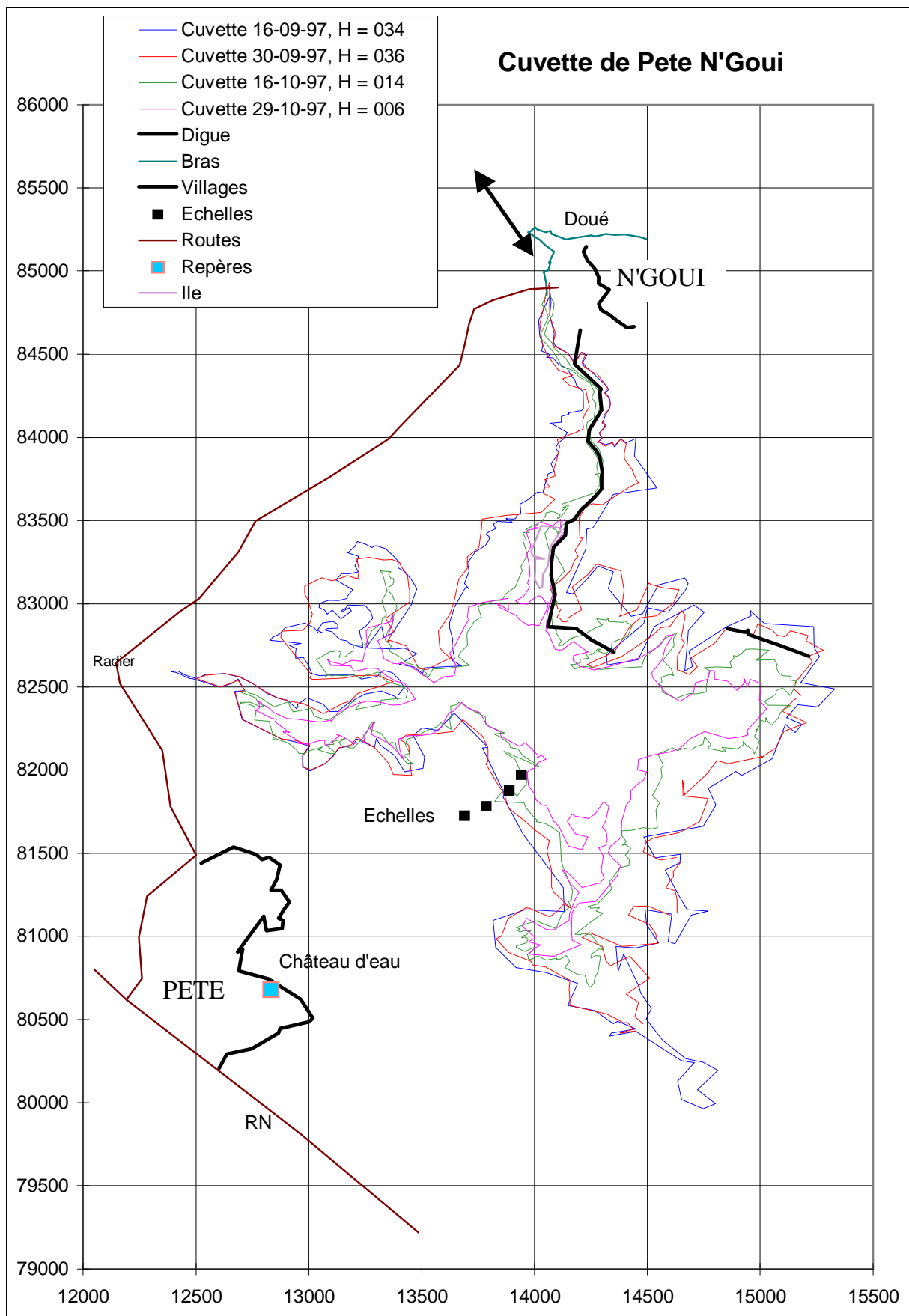




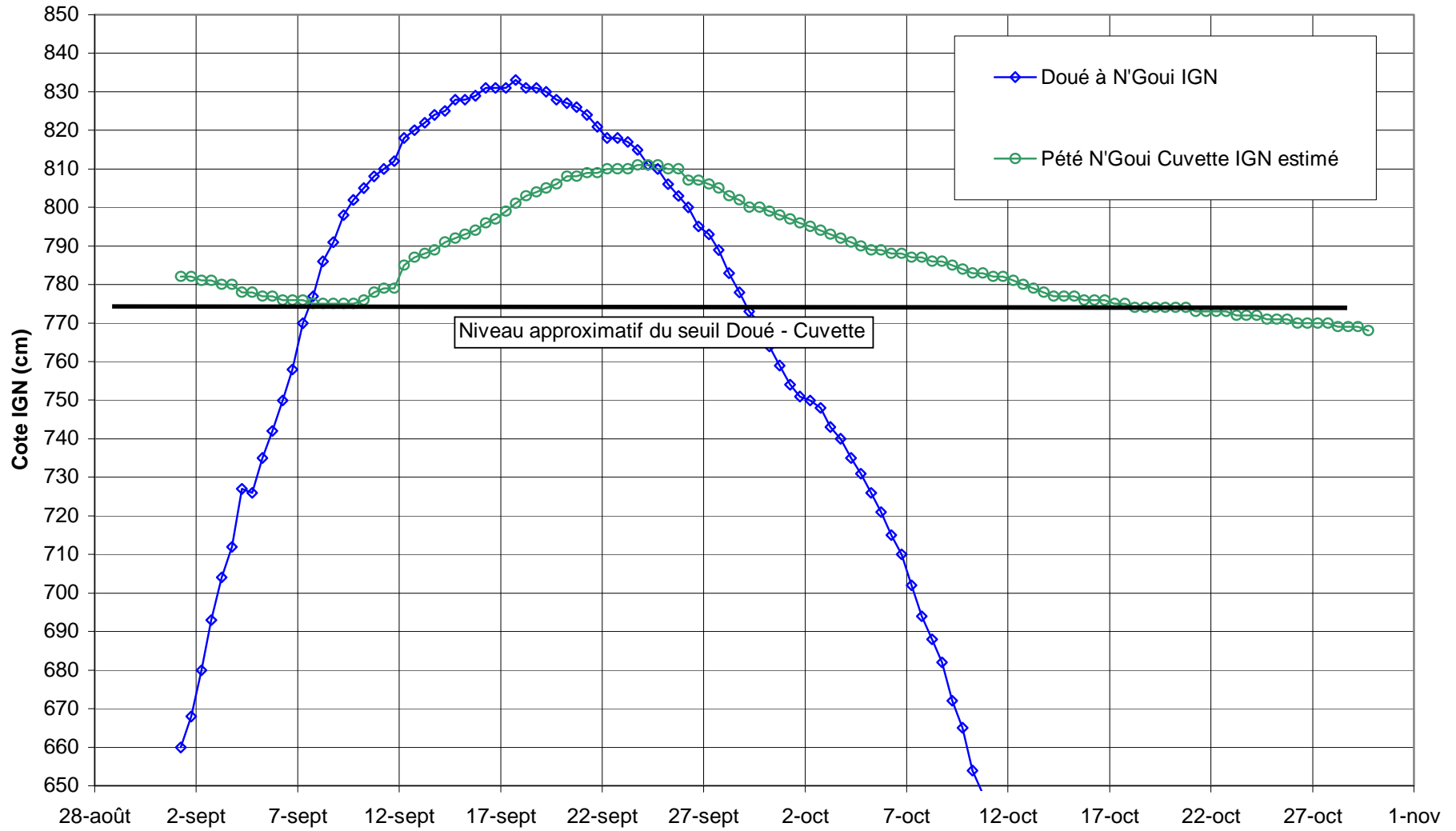


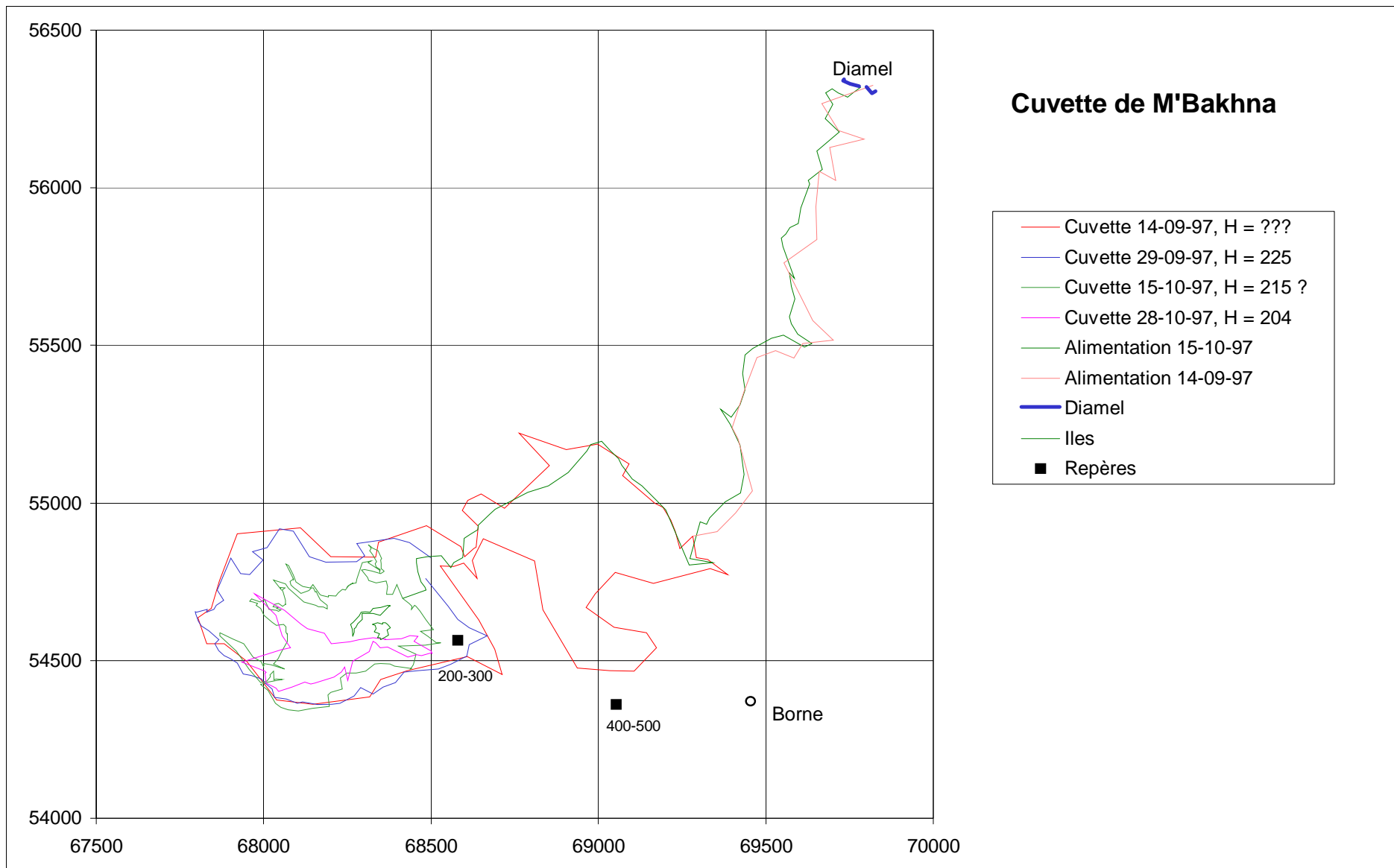
Cuvettes de Wawa et de Donaye, crue 97



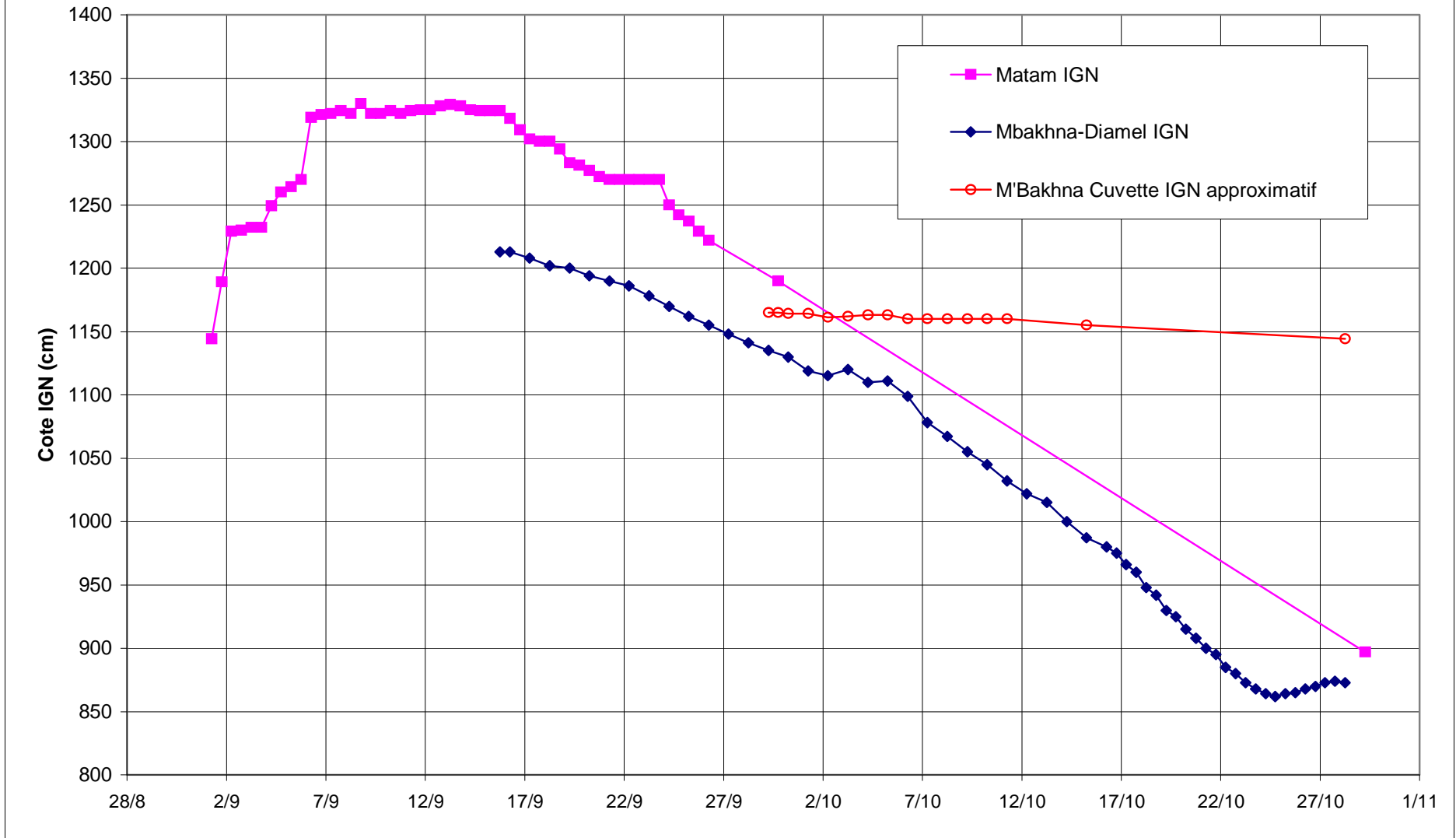


Cuvette de Pété N'Goui, crue 97

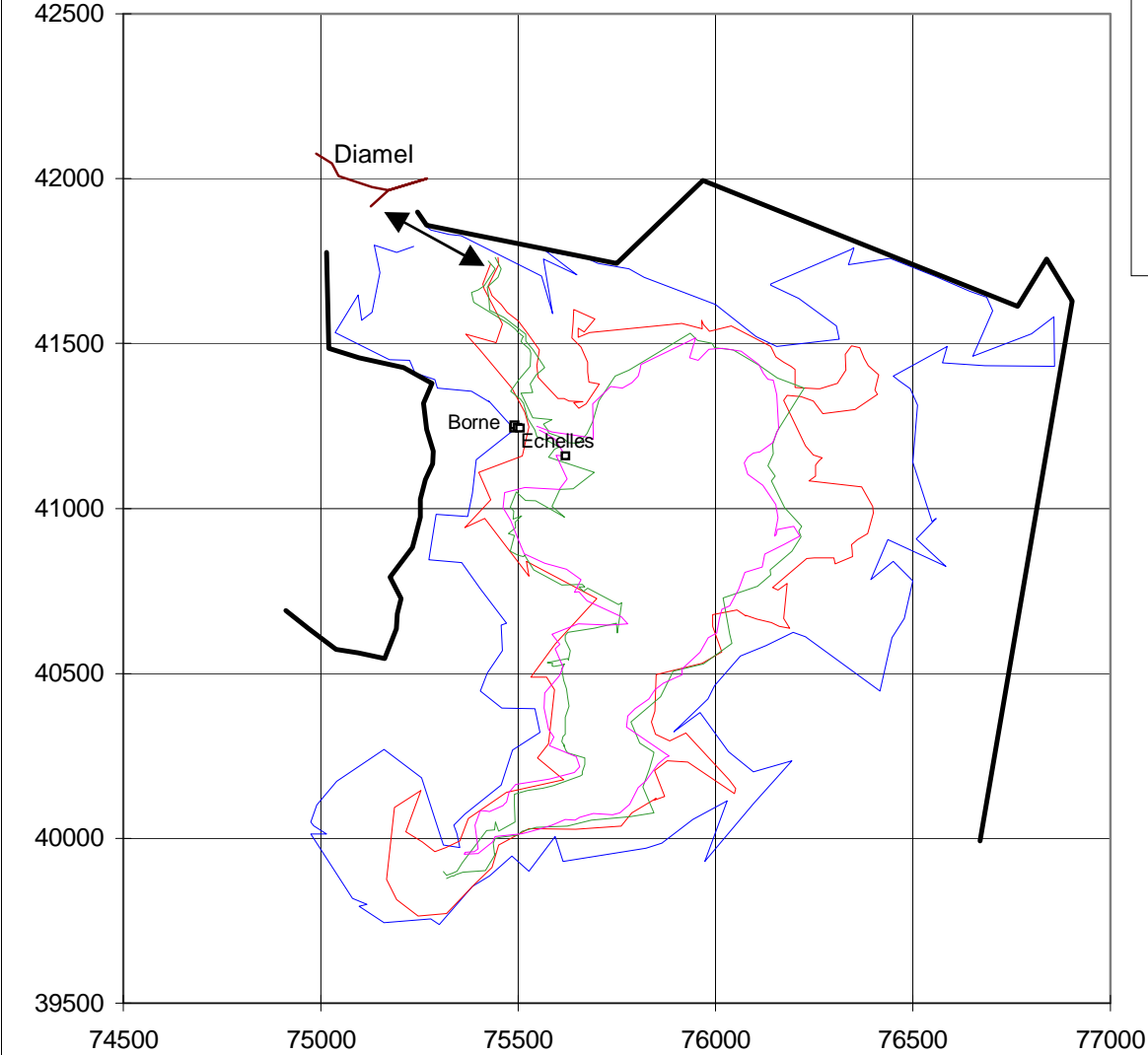




Cuvette de M'Bakhna, crue 97

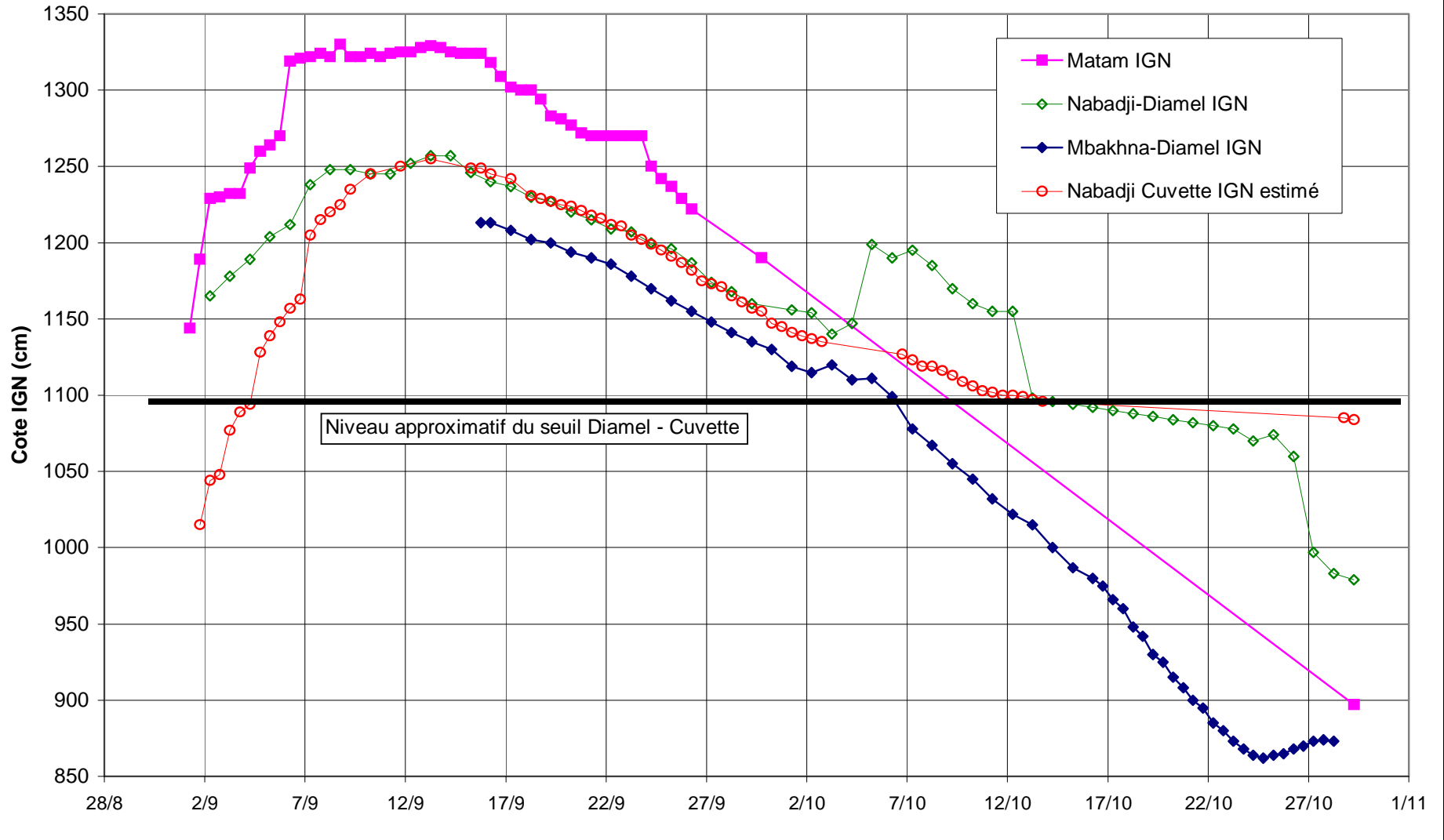


### Cuvette de Nabadji



- Cuvette 15-09-97, H = 314 sur 200-300
- Cuvette 29-09-97, H = 221 sur 200-300
- Cuvette 15-10-97, H = 157 sur 200-300 (163)
- Cuvette 28-10-97, H = 150 sur 200-300 (156)
- Digues
- Echelles
- Bras

### Cuvette de Nabadji, crue 97



# ANNEXES



**FLEUVE SENEGAL**  
**ETUDE DE LA GESTION des RESERVOIRS**  
**TERMES DE REFERENCE**

**1. L'organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal (OMVS)**

Créée le 11 mars 1972, regroupe les trois pays riverains du fleuve: Mali, Mauritanie, Sénégal. Sous son impulsion deux barrages, Manantali et Diama ont été réalisés et permettent depuis 1988 une régularisation partielle du fleuve. Un ambitieux projet d'alimentation en énergie des trois pays à partir du barrage de Manantali est en cours d'instruction. A l'horizon 2000, l'OMVS devra veiller à ce que la gestion des deux barrages assure la production électrique, le développement de l'agriculture et à terme la navigation fluviale, tout en minimisant les impacts négatifs sur l'environnement.

Depuis 1994, les bailleurs de fonds du projet Energie ont analysé avec l'OMVS les conditions d'une gestion efficace des investissements hydroélectrique proposés des réformes institutionnelles profondes. Le principe de ces réformes a été accepté en mai 1996 (réunion OMVS - Bailleurs de fonds à Paris) et juin 1996 (séminaire institutionnel à Dakar).

Leur mise en œuvre, dans l'optique de recentrer le Haut Commissariat sur ses missions publiques à caractère régional, implique de doter celui-ci de moyens techniques complémentaires. Parmi ces missions deux sont essentielles:

- la répartition des eaux entre les pays et les usages et l'harmonisation des législations des eaux du fleuve entre les Etats,
- l'établissement des règles de gestion des eaux (générales et annuelles en fonction de l'hydrologie) et la vérification de leur respect par les sociétés gestionnaires,

**2. Le fleuve Sénégal** est alimenté principalement par trois affluents: le Bafing, le plus important, est régularisé par le barrage de Manantali, alors que le Bakoye et la Falémé ne le sont pas. Ces trois affluents prennent leur source dans le massif du Fouta Djallon, mais malgré la brièveté de la saison des pluies (3 à 4 mois), leurs crues ne se produisent pas à la même date. Avant la réalisation du barrage de Manantali, le débit du fleuve Sénégal devenait pratiquement nul à l'étiage en fin de saison sèche et l'eau salée remontait dans le lit mineur à plus d'une centaine de kilomètres de l'embouchure.

Le barrage de Diama réalisé de 81 à 86 a pour effet d'empêcher la remontée de l'eau de mer. De plus, les endiguements réalisés en rives droite et gauche ont permis de créer une retenue importante (250 millions de m<sup>3</sup> à la cote 1,5 m) et d'améliorer sensiblement le remplissage des lacs de Guiers (Sénégal), de R'kiz ainsi que de la dépression de l'Aftout es Sahel en Mauritanie. Ces ouvrages ont permis, dans le Delta et la basse vallée, l'aménagement sur financements publics de nombreux périmètres en irrigation contrôlée puis le développement d'aménagements rizières privés. Ce développement devrait s'accélérer lorsque la cote de la retenue sera relevée à 2,3/2,5 m, ce qui rendra possible une irrigation gravitaire dans la majeure partie du delta et permettra une diversification des cultures dans des terres hautes non irrigables auparavant.

Le barrage de Manantali, qui permet le stockage de 11,5 milliards de m<sup>3</sup>, a actuellement un rôle régulateur. Il permet de maintenir, toute l'année, lorsqu'il est plein, un débit supérieur à 200 m<sup>3</sup>/s nécessaire aux besoins de l'agriculture irrigation contrôlée et assure un soutien à la crue naturelle des affluents non régularisés.

Ce soutien, dont la suppression avait été envisagée est indispensable pour préserver l'environnement dans la moyenne vallée et permettre les cultures de décrue, qui présentent une bonne rentabilité pour les agriculteurs.

La gestion des réservoirs est actuellement assurée à partir des mesures de débit ou de hauteur d'eau, sur le Bafing à l'entrée du réservoir de Manantali et sur le fleuve en aval des confluent non régularisés. Ces mesures collectées en temps réel permettent une gestion des réservoirs pendant la saison sèche. Mais l'absence de prévisions pluie-débit sur le bassin versant des trois affluents du fleuve ne permet pas au gestionnaire de coordonner les lâchés du barrage de Manantali avec les crues naturelles des affluents non régularisés.

### **3. L'étude comprend trois parties distinctes mais indissociables**

- la connaissance des débits, très en amont du barrage, pour affiner la prévision de la crue naturelle des affluents non régularisés et du Bafing une dizaine de jours à l'avance. Ce délai permettra de limiter le soutien de la crue à partir du barrage (crue artificielle) en le faisant concorder, autant que possible, avec le maximum de la crue naturelle ou, en cas de forte pluviométrie, d'écarter la crue naturelle. En période de déficit pluviométrique prononcé, il permettra au Haut Commissariat, en liaison avec les autorités politiques, de procéder à des arbitrages entre les différents usages de l'eau.
- la détermination de la crue optimale nécessaire au maintien des cultures de décrue, à la recharge des nappes, à la préservation des écosystèmes, tout en minimisant les pertes de la production électrique.
- la mise en place des outils de prévision et de suivi des débits et des instruments de gestion des ouvrages,

### **4. Prévision des débits amonts**

La crue artificielle n'entraînera pas de contrainte insupportable pour les autres usages de l'eau si le soutien à la crue naturelle est limité. Pour cela, il est nécessaire de faire concorder le soutien à la crue naturelle avec le sommet de l'hydrogramme résultant de la somme des débits du Bakoye et de la Falémé. Cette méthode devrait permettre d'économiser 3 à 4 milliards de m<sup>3</sup>.

Pour réaliser cette opération, il est nécessaire de disposer d'un réseau pluie-débit dans le bassin versant des trois affluents du Sénégal, relié en temps réel aux centres de décision (Haut Commissariat, barrage de Manantali). Ce réseau de stations devra être placé suffisamment en amont pour permettre une prévision des débits à Bakel à plus de huit jours.

Les prestations à réaliser sont les suivantes:

- Modélisation des apports du barrage de Manantali. Deux techniques de modélisation seront utilisées dans l'élaboration du modèle global de prévision des apports dans la retenue du barrage:
  - \* Modèle de prévision pluie-débit à l'amont des stations de Dakka Saïdou ou Balabori, à l'aide d'une technique d'analyse statistique de type « DPFT ».
  - \* Modèle de propagation de Dakka Saïdou, ou Balabori, à Bafing Makana, considéré comme entrée en amont de la retenue.
- Modélisation des apports des tributaires non contrôlés. Les mêmes techniques seront utilisées pour la Falémé, le Bakoye et le Baoulé. Ces prestations comprendront la critique des données pluviométriques, le développement et le calibrage des modèles pluie-débit, des modèles de propagation.
- Equipement en pluviographes et limnigraphes des hauts bassins (Falémé, Bafing, Bakoye). Le nombre et la nature de ces appareils seront déterminés lors de l'étude. Le réseau existant est basé sur la technique de télétransmission par satellite ARGOS. Cette technique que l'on peut considérer comme fiable à l'heure actuelle sera utilisée dans le cadre de l'extension du réseau vers l'amont du bassin.
- Equipement du barrage de Manantali avec une station réception et transfert à l'OMVS de la station située à l'ORSTOM. Les stations principales seront reliées par un réseau BLU ainsi que les centres de décision. La prestation comprendra également les abonnements ARGOS.
- Elaboration d'un nouveau modèle de propagation.

## 5. Etude de la crue optimale

L'objectif est de définir une crue permettant d'assurer la recharge des nappes, la culture de décrue sur une zone de 50 000 ha, de préserver les écosystèmes et bien entendu de limiter les pertes de production électrique. Cette crue devrait également être compatible avec l'objectif à long terme de 300 000 ha de cultures en irrigation contrôlée.

L'ORSTOM dispose de mesures de débits, sur le fleuve à Bakel, depuis 100 ans, et ces mesures ont été homogénéisées depuis 1950. L'OMVS a mis en place en 1986 un réseau d'observation des niveaux des nappes qui comprend, dans la zone concernée par la crue, près de 320 piézomètres et 500 puits et forages villageois. Les mesures ont été faites pendant quatre ans par l'OMVS et depuis 1990, date de leur rétrocession aux Etats, uniquement dans la partie mauritanienne. A partir de l'étude réalisée par l'EIER on pourra mesurer le rapport entre l'importance de la crue et la recharge des nappes.

Plusieurs actions sont prévues:

- création (ou amélioration) d'un outil permettant le transfert des contraintes de quelque origine qu'elles soient à la station de Bakel. La synthèse des contraintes sommables (consommations diverses - potable - irrigation - etc. ...) et non sommables (cultures de décrues, environnement) effectuée à Bakel doit conduire à la génération d'un limnigramme optimisé au niveau de cette station.
- typologie et sélection de trois sortes de cuvettes qui serviront de vérité-sol pour la télédétection. Ces types de cuvettes, situées dans le département de Podor, seront issues des observations réalisées lors de l'élaboration du « Schéma directeur du département de Podor » (une zone témoin supplémentaire sera étudiée dans la région de Matam, afin de confirmer tes hypothèses).
- équipement hydrologique pour effectuer le suivi du remplissage et la vidange des cuvettes,
- modélisation du remplissage en fonction du limnigramme du fleuve au droit des seuils des défluent alimentant ou vidangeant les cuvettes,
- étude poussée du gradient naturel de crue et de décrue de manière à fixer la valeur des gradients limites pour ne pas provoquer d'érosion artificielle dans les défluent,
- établissement de limnigrammes optimisés au droit de ces défluent après étude de l'efficacité du remplissage et de la durée de submersion des sols, transfert par rétropropagation des limnigrammes au droit de Bakel,
- comparaison des limnigrammes ainsi ramenés à Bakel avec ceux issus des contraintes environnementales et des besoins sommables, synthèse conduisant à un limnigramme optimisé,
- fixation de critères de démarrage des lâchés de Manantali en fonction des crues de Bakoye et de la Falémé. Une analyse fine des crues de ces deux affluents non contrôlés (au pas de temps journalier) sera réalisée afin de fixer les critères de démarrage des lâchés conduisant à minimiser le volume d'eau issu de la retenue d'eau de Manantali.

Les analyses des contraintes prévues au point ci-dessus tiendront compte d'un certain nombre d'hypothèses:

- \* le système hydraulique du fleuve présente un équilibre géomorphologique général qui autorise à penser que si la crue artificielle est optimisée à la hauteur de Podor, elle doit l'être pour le reste de la vallée.
- \* les fréquences des crues sont liées sur tout le bief du fleuve qui s'étend de l'aval de Bakel. Une crue de période de retour garde la même période de retour dans toute la vallée.
- \* le premier modèle provisoire de simulation du fonctionnement des aménagements doit fournir des résultats dès la fin de première année, les études de télédétection seront donc menées à partir de l'imagerie existante et des données limnimétriques correspondantes.

Les images SPOT ou LANDSAT nécessaires à l'étude de quatre crues passées de caractéristiques différentes (une faible -deux moyennes - une forte ) devront être acquises. Le traitement de ces images devra être compris dans la prestation.

L'acquisition et le traitement des images nécessaires au suivi et à l'évaluation de la première crue optimisée feront l'objet d'un autre financement et ne font pas partie de ces termes de référence.

## 6. L'étude des impacts de la crue

Les enquêtes devront être pratiques et être centrées sur le suivi et l'évaluation des impacts de la crue. Il ne devra s'agir ni d'enquêtes anthropologiques ni d'enquêtes d'inventaire et de recensement. Elles devront concerner les domaines de l'agriculture de décrue, des forêts et des eaux souterraines.

- Agriculture et pâturages de décrue, les enquêtes devront permettre notamment:
  - \* de s'informer sur les terres potentiellement exploitables pour les cultures et les pâturages de décrue ayant besoin d'être inondées,
  - \* de vérifier sur le terrain les caractéristiques de l'inondation et de recueillir l'opinion des populations sur les inondations souhaitées,
  - \* d'identifier les obstacles à l'inondation de certaines cuvettes,
  - \* d'appréhender les raisons pour lesquelles des terres bien inondées et potentiellement cultivables ne l'ont pas été,
  - \* de proposer des améliorations pour la crue suivante.
- Forêts. Le projet Prowalo, qui a démarré en 1984, a effectué sur la base d'images spot de 1991 une nouvelle cartographie du couvert végétal de la vallée en rive gauche dans les départements de Dagana, Podor et Matam. Cette cartographie a permis de cerner l'occupation des sols dans les zones étudiées et de lancer en 1993 un inventaire des massifs forestiers. Ces études constituent une bonne situation de référence par rapport à laquelle l'impact des crues sur les forêts pourrait être aisément évalué. Une superposition des données de superficies inondées à celles de l'occupation des sols serait, par exemple, un bon moyen de suivi.

Les enquêtes sur les forêts devront avoir les principaux objectifs suivants:

- \* évaluer la durée d'inondation des peuplements forestiers présents dans la zone enquêtée, estimer le niveau de germination et de régénération naturelle due à la crue,
  - \* identifier les entraves à l'alimentation normale par les crues, des forêts situées dans les dépressions,
  - \* proposer des améliorations pour la crue suivante.
- Eaux souterraines. L'étude de synthèse hydrogéologique de la vallée qui est actuellement en cours de finalisation doit améliorer les connaissances sur les mécanismes d'échanges entre le fleuve et les nappes. Elle proposera également une méthodologie de suivi de l'impact de la crue sur les eaux souterraines. Sans anticiper sur les résultats de cette étude on s'attend à l'identification d'un réseau minimum de piézomètres et la définition de procédés de collecte et d'analyse des données qui permettront, dans le cadre de l'étude du programme d'optimisation, d'évaluer les impacts de la crue sur les nappes souterraines.
  - L'impact de la crue sur les populations de poissons sera traité par ailleurs et ne fait pas partie de la prestation demandée à l'ORSTOM.

Les enquêtes devront être organisées dans les zones de Podor et Matam au sens large, c'est à dire à cheval sur les deux rives. En effet, ces zones ont servi pour le projet test de l'OMVS de 1986 à 1990, et d'importantes informations de référence y sont disponibles et devraient faciliter les enquêtes de terrain.

Les enquêtes devraient, autant que possible, utiliser au maximum l'expérience de terrain des services nationaux locaux et des projets sectoriels qui mènent des programmes dans des domaines ciblés. Il faudra en conséquence identifier des structures et personnes clés sur le terrain et qui, dans le cadre de leurs activités sont en mesure de collaborer au suivi et à l'évaluation des impacts. On peut penser aux services locaux de l'agriculture pour les cultures de décrue, de l'élevage pour les pâturages de décrue, des eaux et forêts pour les forêts.

## 7. Manuel de gestion des réservoirs

## ANNEXE 1A

Les gestionnaires disposent d'un logiciel de gestion PROGESEN, qui permet, en fonction du débit demandé à Bakel, de gérer les lâchés de Manantali. Ce logiciel travaille en temps réel avec les données télétransmises par les quatre stations de l'amont. n devra être enrichi pour intégrer les données fournies par le réseau pluie-débit de prévision des crues.

- Modélisation de la gestion: le modèle de gestion en temps réel sera calibré à partir du nouveau modèle de propagation calé sur les données récentes. L'utilisation du barème d'étalonnage des vannes de vidange du barrage de Manantali n'étant pas satisfaisant, il sera nécessaire de mesurer les débits sortant de la retenue et de tarer réellement les vannes de l'ouvrage avant d'effectuer un bilan de la gestion 1987/1995. Les étalonnages des stations prises en compte dans le modèle de gestion seront vérifiés: pour ce faire, une campagne de mesure durant l'hivernage 1997 sera réalisé à l'aide d'un matériel mettant en œuvre la technique DCP (effet DOPPLER).

Les modules amont correspondant aux apports dans la retenue et ceux des affluents non contrôlés seront intégrés au modèle global qui deviendra alors PROGESEN 2.

- Le logiciel SIMULSEN permet de simuler la gestion des ressources en eau du fleuve, en fonction des divers scenarii fixés par l'utilisateur. Celui-ci fixe les consignes de gestion correspondant aux objectifs du barrage de Manantali et les classe par ordre de priorité. Le scénario retenu est ensuite simulé sur une longue période et l'ordinateur fournit le nombre de jours de défaillance du système en fonction des périodes de retour. Ce logiciel a déjà été modifié pour prendre en compte une prévision de huit jours sur les débits du haut bassin. Des modifications supplémentaires devront être intégrées:
  - \* modification du pas de temps de calcul qui sera hebdomadaire pour l'énergie,
  - \* modification du support de développement et de fonctionnement (système 32 bits),
  - \* augmentation du nombre de priorités,
  - \* introduction des temps de propagation, issus du modèle support de transfert de la crue afin de traiter les contraintes avec précision,
  - \* la possibilité de création d'échantillons virtuels de 100 années de données sera examinée de manière à éviter certaines simulations sur la série historique entachée d'erreurs du fait du poids statistiques trop important de la grande sécheresse de la période 1968/1992.

Le logiciel de simulation devra rendre possible l'analyse des résultats de chaque scénario, et l'évaluation des bilans économiques: énergie - couverture des besoins sommables et non sommables. Une évaluation des défaillances en jour, pour des fréquences de crues données, sera effectuée et servira de critère de comparaison.

Ce logiciel intégrera les apports dans la retenue de Manantali qui devraient pouvoir être prévus avec un délai compris entre 10 et 12 jours.

Sur ces bases, un manuel de gestion du barrage de Manantali sera élaboré. Il intégrera le scénario de gestion optimisé avec un système de mise à jour couplé aux résultats des simulations obtenues grâce à SIMULSEN 2. Les règles à appliquer correspondront aux objectifs fixés dans le cadre du scénario optimum. Tous les cas seront envisagés de manière à donner des ordres de priorité en cas de déficits chroniques ou d'oppositions entre usages.

### **8. Durée de l'étude**

L'étude s'étendra sur trois années.

Pendant la première année il s'agira de:

- déterminer l'hydrogramme théorique de la crue optimale, - effectuer des simulations de gestion des réservoirs tenant compte de cet hydrogramme, - rédiger une première version du manuel de gestion des réservoirs.

Pendant les deux autres années il s'agira de:

## ANNEXE 1A

- évaluer les impacts de la crue conformément au paragraphe 6
- installer des stations de mesure pluie-débit,
- adapter les logiciels PROGESEN et SIMULSEN pour prendre en compte les prévisions amont des débits des trois affluents,
- procéder aux tests et à l'affinage de la crue optimale en tenant compte notamment des conclusions des études sur la préservation de l'environnement qui auront pu être menées par ailleurs ( évolution des populations de poissons, etc. ),
- finaliser le manuel de gestion.

### **9. Suivi de l'étude**

Le suivi de cette étude sera assuré par un comité comprenant des représentants du Haut Commissariat, de la SOGEM, de la SOGED, de la Mission Française de coopération et des bailleurs de fonds du projet énergie. L'ORSTOM rendra compte de l'avancement de ses travaux selon un calendrier établi par ce comité.

**FLEUVE SENEGAL**

**ETUDE DE LA GESTION DES RESERVOIRS**

**TERMES DE REFERENCE DE LA PREMIERE PHASE**

Cette étude s'inscrit dans le cadre des termes de référence de l'étude globale ( ci joints ) dont elle constitue la première partie. Les actions prévues dans le cadre de cette étude portent uniquement sur la préparation et le suivi de la crue 1997. Elles comprennent :

**Prévision des débits amonts**

Dans le cadre du paragraphe 4 des termes de référence de l'étude globale, les actions suivantes seront effectuées:

- mise au point du modèle de propagation,
- remise en état des limnigraphes en place ( Bakel, Oualia, Gourbassy, Kayes, Dagana ),
- installation d'un réseau provisoire de prévision sur le Bakoye, le Baoulé et la Falémé à partir d'anciens appareils de l'OMVS qui seront remis à niveau.

**Optimisation de la crue artificielle**

Dans le cadre du paragraphe 5 des termes de référence de l'étude globale, les actions suivantes seront effectuées

- étude de démarrage des lâchés du barrage de Manantali. Cette étude sera effectuée à partir de l'étude statistique des débits des affluents non contrôlés afin d'optimiser la date de démarrage des lâchés et leur amplitude. La prévision utilisée sera celle donnée par les limnigraphes Chloé installés en début de projet sur les biefs amonts.
- la forme de la crue artificielle 1997 sera établie avant le 20 juillet 1997.
- Une mission début Juin choisira les sites du lit majeur représentatifs du processus de mise en eau de ce dernier. Trois cuvettes ou série de cuvettes seront choisies puis équipées d'échelles limnimétriques, une ou deux lectures quotidiennes étant suffisantes pour suivre le remplissage des cuvettes avec précision. Une fonction de transfert de la crue du lit principal ( Sénégal ou Doué ) sera établie après la crue 1997 afin de préciser les contraintes induites au niveau de Bakel.

La brigade hydrologique de Saint Louis assurera l'équipement hydrologique des cuvettes et contrôlera les observateurs.

Une observation de mise en eau du lit majeur en rive droite sera examinée. Son étendue sera fonction des possibilités de motivation des services Mauritaniens ( SONADER, Hydraulique, etc. ) dans les délais impartis à cette première phase d'étude.

- L'extension des zones inondées, lors de la crue 97, sera assurée en utilisant des GPS avec report éventuel sur le SIG dans le but de renseigner l'étude de télédétection qui débutera en début de phase 2.

**Durée de la première phase**

La première phase de l'étude s'étendra du 20 Mai au 30 Septembre 1997.

## Annexe 2.A

### Valeurs des paramètres d'étalonnages, de modèles autorégressifs et de modèles de propagation figurant dans PROGEMAN

#### ***Le Bakoye à Diangola (aucune donnée en temps réel en 1997)***

Autorégression sur les cotes, aux horizons 2 et 1 jour, calée respectivement sur les données de août - septembre des périodes 1973-1992 et 1973-1988. Les relations données ci-dessous s'appliquent sur les cotes référencées au zéro d'échelle de la période 1983-1988. Ce zéro a été remonté de 1 mètre à partir de 1989.

$$H(j+2) = 1,23 H(j) - 0,66 H(j-1) + 0,4 H(j-2) + 15,6$$

$$H(j+1) = 1,41 H(j) - 0,73 H(j-1) + 0,3 H(j-2) + 6,21$$

#### ***La Falémé à Fadougou (aucune donnée en temps réel en 1997)***

Autorégression sur les cotes à l'horizon 1 jour, calée sur les données de août-septembre de 1952 à 1987 :

$$H(j+1) = 1,37 H(j) - 0,58 H(j-1) + 0,15 H(j-2) + 22,1$$

Transformation des cotes en débit par étalonnage biunivoque :

H (cm)	0	4	10	17	32	48	70	100	132	180	220	260	300	400	500	600	700	800	1000	1200
Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	0	0	1	2	5	10	20	38	61	101	144	194	255	415	590	775	995	1250	1820	2440

Autorégression sur les débits à l'horizon 2 jours, calée sur les données de août-septembre de 1970 à 1987 :

$$Q(j+2) = 0,87 Q(j) - 0,07 Q(j-2) + 50,1$$

#### ***Le Bakoye à Oualia***

Autorégression en cotes aux horizons 2 et 1 jour, calée sur les données de août-septembre de 1954 à 1994 :

$$H(j+2) = 1,06 H(j) - 0,25 H(j-1) + 0,14 H(j-2) + 23,4$$

$$H(j+1) = 1,17 H(j) - 0,31 H(j-1) + 0,12 H(j-2) + 11,1$$

Transformation des cotes en débits par étalonnage biunivoque :

H (cm)	45	50	70	90	120	160	200	240	280	320	360	400	440	560	580	600	650	750	900	1100
Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	0	0	4	11	30	71	124	177	231	300	388	479	577	877	928	978	1120	1420	1850	2450

Modèle de propagation donnant le débit à Oualia au jour j+D en fonction de la cote au jour j à Diangola (référéncée au zéro de la période 1983-1988), calé sur la période 1985-1992 :

H(j) Diangola (cm)	0	220	260	320	401	480	603	704	800
Q(j+D) Oualia (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	0	30	77	160	285	440	615	735	800
D (jour)	0	0.2	1	2	2.7	3	3	3	3



## La Falémé à Gourbassy

Autorégression en cote aux horizons 2 et 1 jour, calée sur les données de août - septembre de 1954 à 1994 :

$$H(j+2) = 1,66 H(j) - 1,02 H(j-1) + 0,28 H(j-2) + 31,1$$

$$H(j+1) = 1,55 H(j) - 0,74 H(j-1) + 0,16 H(j-2) + 12,2$$

Transformation des cotes en débits par étalonnage biunivoque :

H (cm)	0	25	70	100	140	200	240	280	320	360	400	440	480	520	560	600	640	700	800	950
Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	0	3	14	25	52	117	169	228	294	372	463	564	675	790	904	1020	1140	1310	1600	2040

Modèle de propagation donnant le débit à Gourbassy au jour j+D en fonction du débit au jour j à Fadougou, calé sur la période 1954-1987 :

Q(j) Fadougou (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	4	3000
Q(j+D) Gourbassy (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	0	4290
D (jour)	2	2

## Le Sénégal à Kayes

Transformation des cotes en débits par étalonnage biunivoque :

H (cm)	10	30	45	65	86	117	162	200	252	300	390	496	500	616	700	887	900	1100	1150	1400
Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	0	1	5	15	29	69	156	254	414	579	925	1370	1390	1940	2380	3560	3660	4720	5000	6400

Modèle de propagation donnant le débit à Kayes au jour j+D en fonction de la somme des débits du jour j à Oualia et Manantali, calé sur la période 1967-1971 :

Q(j) Oualia + Manantali (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	10	17	29	50	59	69	80	100	134	145	172	205	227	244	285	301	381
Q(j+D) Kayes (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	10	19	31	51	58	64	78	99	125	135	166	188	210	222	263	277	353
D (jour)	4	5	8.5	7.5	7	5	3.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2	2
Q(j) Oualia + Manantali (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	405	425	444	523	563	621	664	685	1000	2000	2500	3000	3500				
Q(j+D) Kayes (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	380	399	430	521	554	595	649	681	1040	2207	2710	3365	3955				
D (jour)	2	1.5	1	1	1	1	1	1.5	1.5	1.5	1.5	2	2				

## Le Sénégal à Bakel

Traduction des cotes en débit par étalonnage non biunivoque : méthode du gradient limnimétrique, calée sur les données de la période 1972-1989.

Si on note H (cm) la cote à l'échelle, G (cm jour<sup>-1</sup>) la vitesse de variation de H, ou gradient limnimétrique, Q (m<sup>3</sup>/s) le débit en régime non permanent, et Q<sub>0</sub> (m<sup>3</sup>/s) le débit en régime permanent, alors :

$$Q = Q_0 (1 + KG)^{0,5}$$

H (cm)	20	72	90	120	156	190	226	280	336	410	450	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Q <sub>0</sub> (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	0	7	20	48	90	147	220	360	527	780	945	1170	1640	2170	2750	3510	4360	5265	6270	7600

H (cm)	0	220	350	900	1300
K	0.015	0.015	0.009	0.005	0.005

Modèle de propagation donnant le débit à Bakel au jour j+D en fonction de la somme des débits du jour j à Kayes et Gourbassy, calé sur la période 1955-1985 :

Q(j) Kayes + Gourbassy ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	0	125	250	375	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2500	3000	3500	4000	4500
Q(j+D) Kayes ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	0	137	275	402	521	765	1034	1320	1598	1869	2136	2652	3158	3752	4390	5006
D (jour)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
Q(j) Kayes + Gourbassy ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	5000	5500	6000													
Q(j+D) Kayes ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	5611	6077	6515													
D (jour)	2	2	2													

## Annexe 2-B

### Procédures de correction manuelle des lâchés calculés par PROGEMAN

#### *En cas de non convergence du processus de calcul itératif.*

Notons, en  $m^3/s$ :  
 $Q_L$  la valeur de débit à lâcher calculée par le programme PROGEMAN  
 $Q_b$  le débit à Bakel, calculé par PROGEMAN, résultant du lâcher  $Q_L$   
 $Q_{bo}$  le débit objectif à Bakel  
 $E$  l'écart entre débit obtenu et objectif à Bakel :  $E = Q_b - Q_{bo}$   
 $Q$  la valeur de débit à lâcher corrigée

#### **Pendant la montée de l'hydrogramme ORSTOM1:**

si  $E > 208$  alors:  $Q = Q_L - E + 208$   
si  $208 > E > -208$  alors:  $Q = Q_L$  (donc pas de correction dans ce cas)  
si  $-208 > E$  alors:  $Q = Q_L - E - 208$

Exemples, pour  $Q_L=1000$ :

$E = 300 \implies Q = 1000 - 300 + 208 = 908$   
 $E = 100 \implies Q = 1000$   
 $E = -150 \implies Q = 1000$   
 $E = -400 \implies Q = 1000 - (-400) - 208 = 1000 + 400 - 208 = 1192$

#### **Pendant la descente de l'hydrogramme ORSTOM1:**

si  $E > 28$  alors:  $Q = Q_L - E + 28$   
si  $28 > E > -28$  alors:  $Q = Q_L$  (donc pas de correction dans ce cas)  
si  $-28 > E$  alors:  $Q = Q_L - E - 28$

exemples, pour  $Q_L = 1000$ :

$E = 50 \implies Q = 1000 - 50 + 28 = 978$   
 $E = 20 \implies Q = 1000$   
 $E = -15 \implies Q = 1000$   
 $E = -30 \implies Q = 1000 - (-30) - 28 = 1000 + 30 - 28 = 1002$

#### ***En cas de mauvaise adéquation des modèles de propagation***

La procédure de correction en boucle fermée envisagée ici vise à affiner le calcul de lâcher en prenant en compte les variations d'apports ou pertes intermédiaires entre les stations. Elle peut également être efficace en cas d'erreur systématique affectant les données ou le tarage d'une station (Oualia, Gourbassy ou Manantali).

Supposons qu'au jour  $j$  on constate que le dernier débit connu à Bakel (jour  $j-2$ , avec l'étalonnage non biunivoque) s'écarte de l'objectif. On diminue en conséquence le lâcher du barrage (jour  $j$ ) de la moitié de l'écart constaté, par rapport à la demande calculée par PROGEMAN. Cette correction doit prendre en compte l'éventuelle différence entre le débit lâché (jour  $j-5$  environ) à l'origine du dernier débit connu à Bakel, et la demande de lâcher correspondante calculée par PROGEMAN.

Si l'on note:

- $Q_{BakObtenu}$  : le débit moyen journalier obtenu à Bakel
- $Q_{BakDésiré}$  : le débit moyen journalier désiré à Bakel
- $Q_{lâché}$  : le débit effectivement lâché du barrage de Manantali
- $Q_{demandé}$  : la demande de lâcher calculée par PROGEMAN
- $Q_{souhaitable}$  : le débit qu'il est souhaitable de lâcher à Manantali

- Correction : la correction souhaitable à apporter à la valeur de lâcher calculée par PROGEMAN

alors on a pour le jour j:

$$Q_{\text{souhaitable}}(j) = Q_{\text{demandé}}(j) + \text{Correction}(j)$$

$$\begin{aligned} \text{Correction}(j) &= 0,5 \{ Q_{\text{bakdésiré}}(j-2) - Q_{\text{bakobtenu}}(j-2) + [ Q_{\text{lâché}}(j-5) - Q_{\text{demandé}}(j-5) ] \} \\ &= 0,5 \{ Q_{\text{bakdésiré}}(j-2) - Q_{\text{bakobtenu}}(j-2) + \text{Correction}(j-5) \} \end{aligned}$$

Par mesure de prudence, les corrections sont limitées dans l'intervalle [-200 , 200]

Cette procédure a été mise en place 'en urgence' pendant la crue de 1997, après qu'on ait observé que les débits obtenus à Bakel étaient plus forts que ceux prévus par PROGEMAN. Le manque de recul nous a obligé à adopter une formule de correction assez simpliste et très prudente. Remplacer le coefficient 0,5 par une valeur plus proche de 1 aurait peut-être permis de faire des corrections plus efficaces, mais au risque de rendre instable tout le système de calcul.

## Annexe 2-C

### **Evaluation en cours de crue, de la possibilité d'obtenir une cote donnée dans le lac de Manantali au début de l'étiage suivant.**

#### ***Principe du calcul***

Les calculs sont effectués avec le logiciel SIMULSEN à partir de la banque de données hydrométriques du régime naturel du haut bassin du Sénégal, sur la période 1970-1993. Pour l'obtention d'une cote de 192 m IGN au 30 juin, le principe est le suivant:

- 1- On définit un hydrogramme objectif couvrant les 365 jours de l'année à Bakel. Dans le cas envisagé ici, il est constitué de l'hydrogramme de crue ORSTOM1, suivi le restant de l'année d'un certain hydrogramme objectif d'étiage.
- 2- Compte-tenu des débits observés en régime naturel aux stations de Oualia et Gourbassy, on calcule au pas de temps journalier, l'ensemble des débits minimaux passant à Manantali qui auraient permis de réaliser à 100%, sur la période 1970-1993, l'hydrogramme objectif annuel défini plus haut.
- 3- En fixant la cote dans le lac à 192m IGN au 30/06/93, on reconstitue par un calcul à rebours, la chronique des cotes minimales dans le lac qui auraient permis d'obtenir les débits minimaux lâchés calculés plus haut. Ce calcul tient compte des apports arrivant dans la retenue, ainsi que des caractéristiques suivantes:
  - débit minimal et débit maximal qu'il est possible de lâcher (par tous les organes d'évacuation), en fonction de la cote du lac
  - volume d'eau stocké dans la retenue en fonction du niveau
  - superficie du lac en fonction du niveau
  - valeurs mensuelles du taux moyen d'évaporation nette sur la retenue.

Au cours du calcul, la cote du lac est en outre imposée à 192m chaque 30 juin.

- 4- La chronique des cotes minimales dans le lac élaborée ci-dessus est analysée de façon statistique. Ainsi pour chaque jour de l'année, les 24 cotes obtenues entre 1970 et 1993 sont classées pour définir une fonction de répartition, qui permet ensuite de calculer les valeurs correspondant à des temps de retour prédéterminés.
- 5- On peut alors tracer des courbes diachroniques de niveaux minimaux dans le lac, correspondant chacune à un temps de retour donné. Ces courbes permettent d'estimer la probabilité d'obtenir une cote supérieure à 192m le 30 juin à venir, en fonction de la cote atteinte à une date donnée pendant la crue.

#### ***Application au cas de la crue de 1997***

Dans tout ce qui suit, l'hydrogramme objectif à réaliser au niveau de Bakel correspond, en période de crue, à l'hydrogramme ORSTOM1 tel qu'il a été calé en 1997: 0 m<sup>3</sup>/s le 26 août; 2500 m<sup>3</sup>/s le 1er septembre; 2500 m<sup>3</sup>/s le 6 septembre; 0 m<sup>3</sup>/s le 20 octobre. Pour le soutien d'étiage qui se raccorde à l'hydrogramme ORSTOM1, on envisage les deux possibilités suivantes:

- A : maintien d'un débit supérieur à 100 m<sup>3</sup>/s à Bakel;
- B : maintien d'un débit supérieur 200 m<sup>3</sup>/s à Bakel;

Niveau minimal requis dans le lac de Manantali pour la réalisation de l'hydrogramme ORSTOM1(début de palier 1er sept.), le maintien du débit à Bakel à 100 m<sup>3</sup>/s le reste du temps, et l'obtention du niveau 192 m le 30 juin.

A

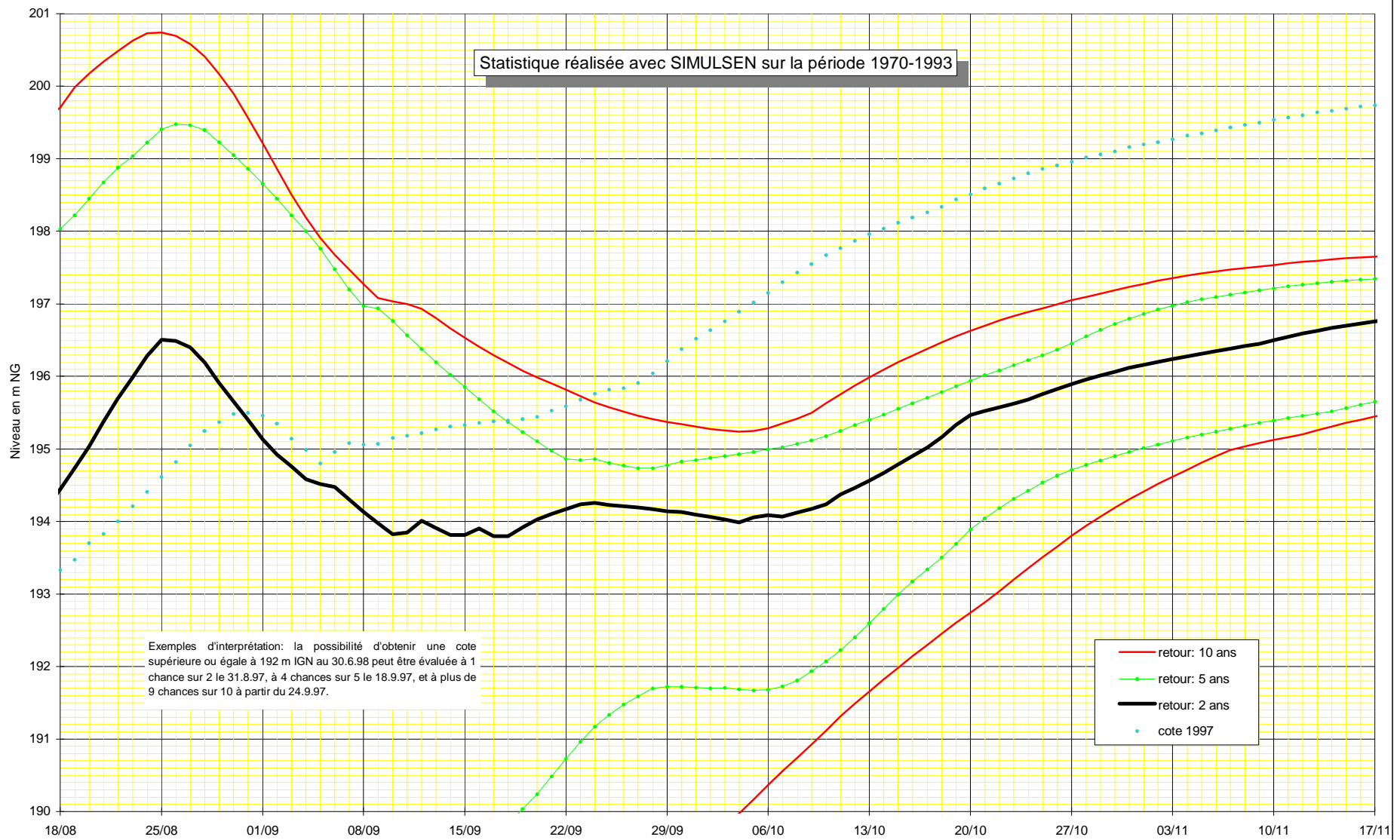


Figure 2.C.1 : probabilité d'obtenir la cote 192 m après un soutien d'étiage à 100 m<sup>3</sup>/s

Niveau minimal requis dans le lac de Manantali pour la réalisation de l'hydrogramme ORSTOM1(début de palier 1er sept.), le maintien du débit à Bakel à 200 m<sup>3</sup>/s le reste du temps, et l'obtention du niveau 192 m le 30 juin.

B

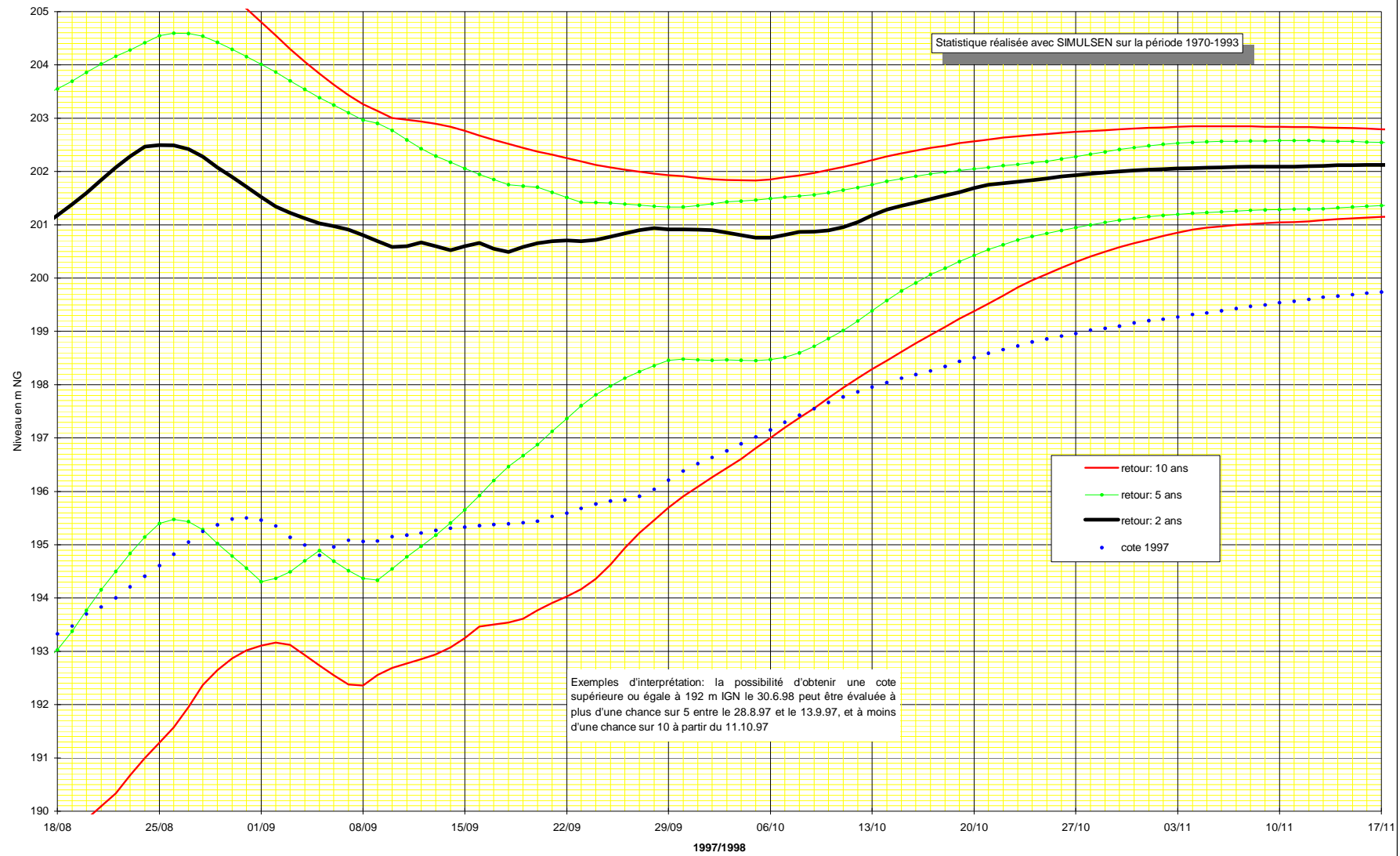


Figure 2.C.2 : probabilité d'obtenir la cote 192 m après un soutien de crue à 200 m<sup>3</sup>/s

Les courbes de niveaux minimaux isofréquence correspondant aux hypothèses A et B sont représentées sur les figures 2-C-1 et 2-C-2 respectivement. D'après ces courbes, on voit que dès septembre 1997, alors que la seconde partie de la crue est encore parfaitement imprévisible, un soutien d'étiage à 200 m<sup>3</sup>/s semble peu compatible avec l'objectif de remplissage du lac à la cote 192 IGN fixé pour le 30 juin 1998, contrairement au soutien de crue à 100 m<sup>3</sup>/s qui semble parfaitement envisageable. Ces tendances s'accroissent et se confirment ensuite au cours de la crue.

D'une façon plus générale, les courbes représentées sur les figures 2-C-1 et 2-C-2, étendues sur l'année entière, indiquent que l'obtention du niveau 192 m le 30 juin dans la retenue de Manantali, nécessite un niveau supérieur à cette valeur au 30 juin de l'année précédente, environ:

- entre une année sur trois et une année sur quatre avec l'hypothèse A
- deux années sur trois avec l'hypothèse B

Autrement dit de façon très schématique, la réalisation systématique de l'hydrogramme de crue ORSTOM1 à date fixe, s'accompagne le plus fréquemment:

- d'une diminution interannuelle du stock d'eau dans la retenue, si le soutien d'étiage est du type B
- d'une augmentation interannuelle du stock d'eau dans la retenue, si le soutien d'étiage est du type A.



## Annexe 2-D

### Vérification du calage du modèle de propagation amont

#### ***Principe du modèle de propagation de l'ORSTOM établi par J.P. Lamagat***

Ce modèle consiste à exprimer la relation entre le débit  $Q_{\text{amont}}$  d'une station à l'instant  $t$ , et  $Q_{\text{aval}}$  résultant à une station située à l'aval au temps  $t+D$ , en calculant par tranches de valeurs de  $Q_{\text{amont}}$  et pour différentes valeurs de  $D$ , les régressions linéaires entre  $Q_{\text{amont}}(t)$  et  $Q_{\text{aval}}(t+D)$ . Pour chaque tranche, on retient la valeur moyenne de  $Q_{\text{amont}}$ , la valeur de  $D$  donnant le meilleur coefficient de corrélation, et la valeur de  $Q_{\text{aval}}$  donnée par la régression retenue. Les relations ainsi établies de façon statistique entre stations successives, tiennent compte en moyenne de l'amortissement des ondes de crues, des pertes, prélèvements et apports intermédiaires.

#### ***Calage du modèle sur les périodes 1967-1983 et 1987-1997***

Lorsqu'on essaie de caler les paramètres du modèle sur l'ensemble des données disponibles des stations de Soukoutali (ancienne station située au droit du futur barrage), Manantali, Oualia et Kayes, on observe une anomalie flagrante affectant tout particulièrement les tranches de débit comprises entre 50 et 1000. Le cumul des résidus de régression ( $Q_{\text{Kayes}} = f(Q_{\text{Oualia}} + Q_{\text{Gourbassy}})$ ) est globalement croissant jusqu'en 1983, puis globalement décroissant à partir de 1987. Ceci traduit le fait qu'un même débit à Kayes correspond à une somme de débit à Oualia et Manantali, plus faible à partir de 1987 qu'avant 1983. Nous avons donc effectué un calage séparé sur les périodes 1967-1983 et 1987-1997, dont les résultats sont présentés dans le tableau 2.D.1 et les figures 2.D.1, 2.D.2 et 2.D.3.

Remarque : pour cette analyse nous ne disposons d'aucune donnée pour les lâchés du barrage effectués entre mai 1990 et avril 1992.

Figure 2.D.2 : calage du modèle de propagation amont en régime naturel et artificiel. Détail des moyennes eaux.

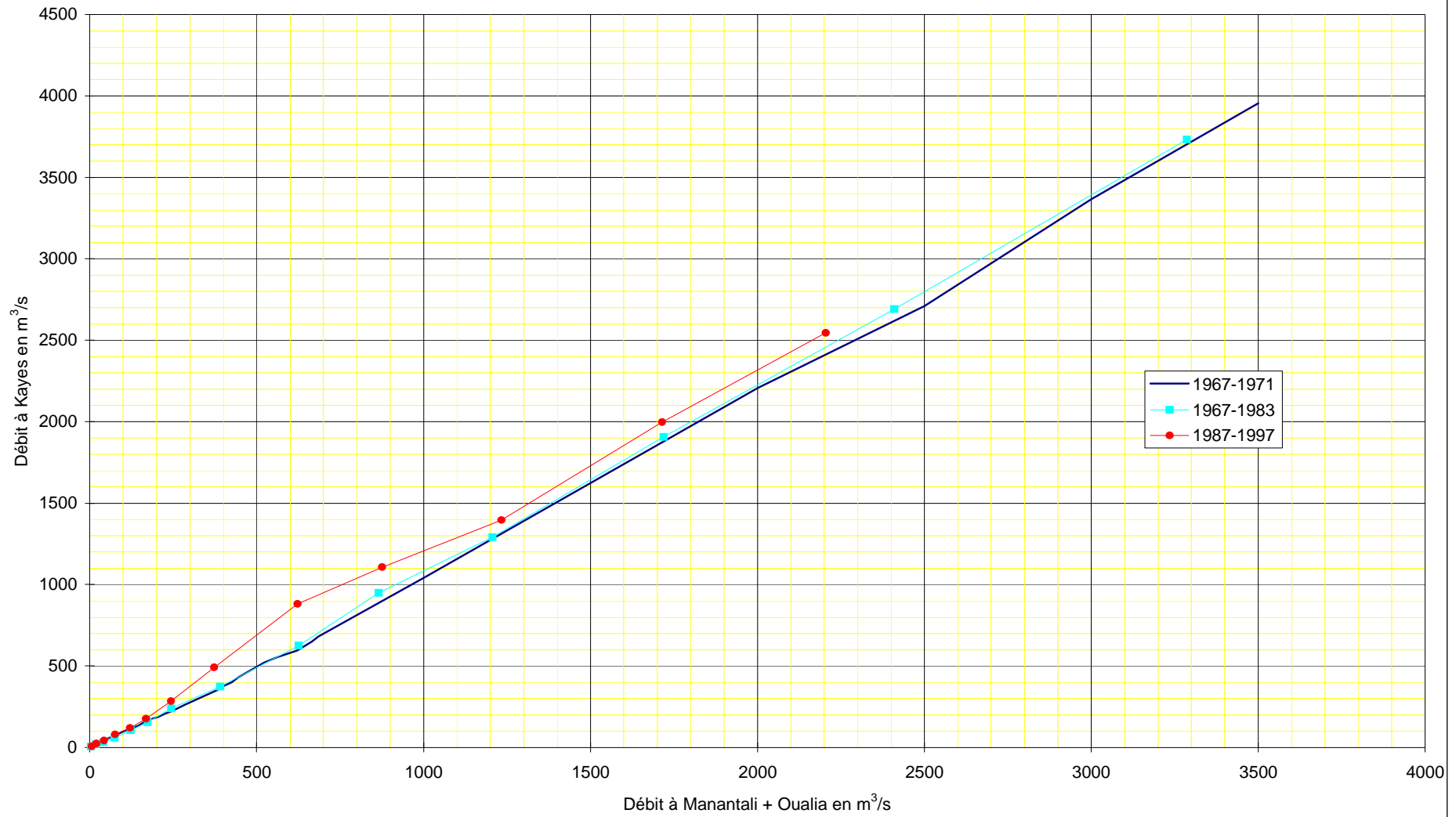


Figure 2.D.1 : calage du modèle de propagation amont en régime naturel et artificiel.

Figure 2.D.2 : calage du modèle de propagation amont en régime naturel et artificiel. Détail des moyennes eaux.

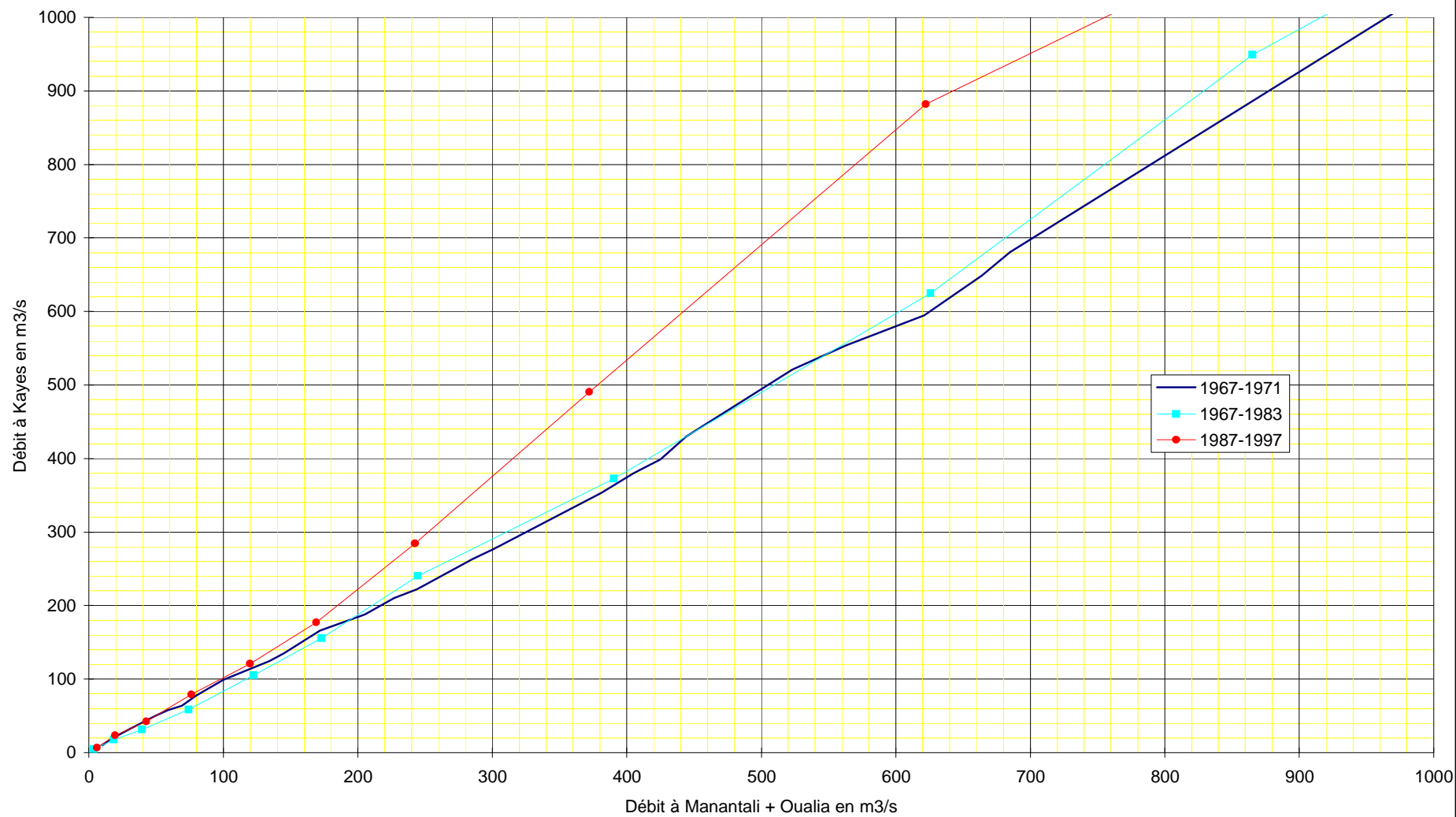
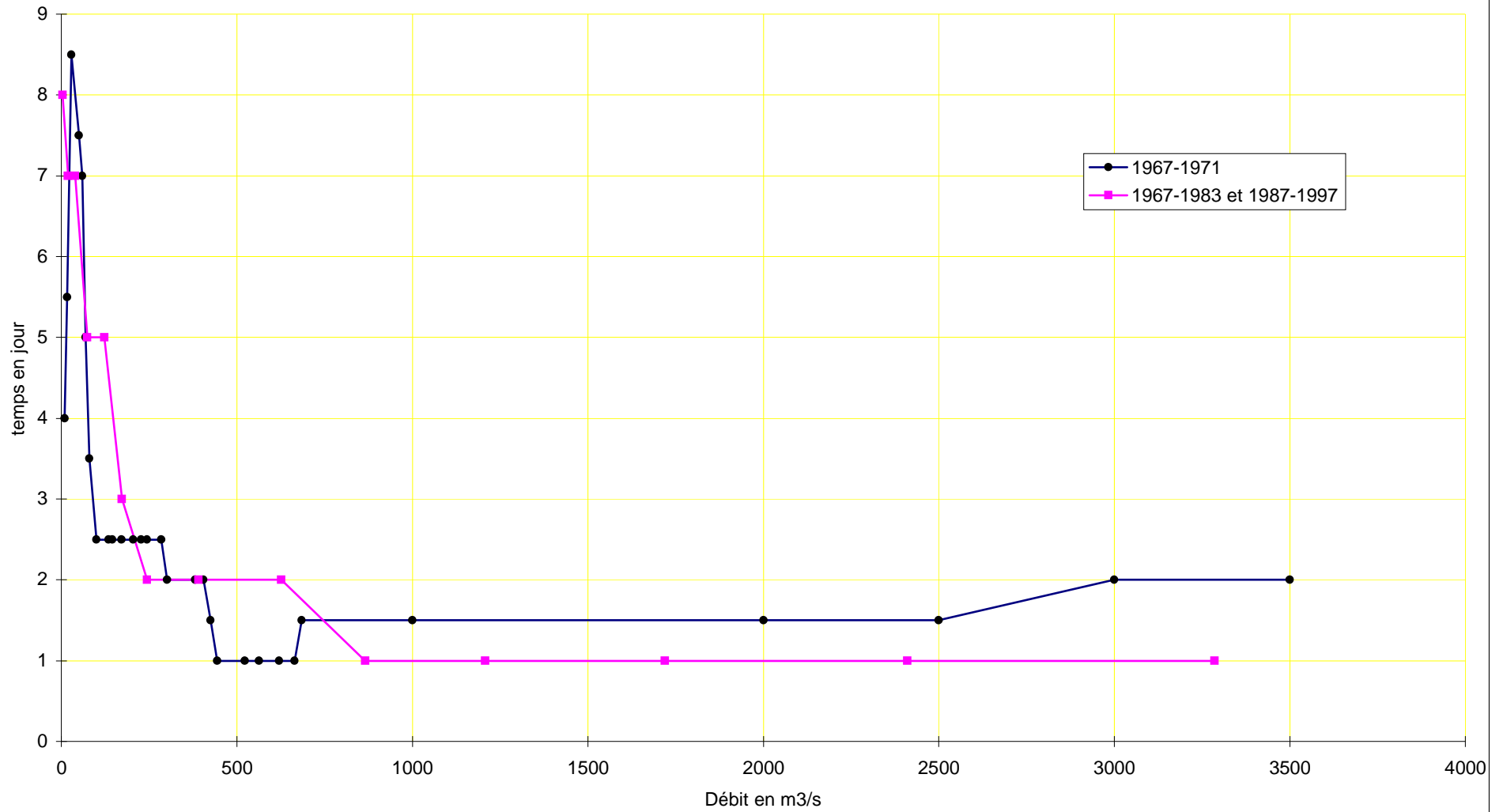


Figure 2.D.3 : Temps de propagation des débits entre Manantali, Oualia et Kayes



	somme des débits au jour j à Oualia et Manantali	débit au jour j+D à Kayes	D : Temps de propagation	R : coefficient de corrélation	écart-type résiduel	plage de débit amont	taille de l'échantillon retenu	nombre de couples éliminés
	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)	(jour)		(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)		
période 1967-1983	3.43	4.61	8	0.788	2.19	0-10	1063	4
	18.6	18.0	7	0.553	5.42	10-30	450	4
	39.6	31.7	7	0.437	8.52	30-50	271	1
	74.1	58.6	5	0.449	21.9	50-100	518	8
	123	106	5	0.370	36.4	100-150	354	2
	173	156	3	0.291	46.5	150-200	225	1
	245	241	2	0.437	51.7	200-300	315	0
	391	373	2	0.570	79.0	300-500	320	2
	626	625	2	0.612	117	500-750	342	0
	866	949	1	0.465	142	750-1000	285	0
	1207	1291	1	0.651	192	1000-1500	299	0
	1719	1906	1	0.602	219	1500-2000	122	0
	2410	2690	1	0.913	194	2000-3000	118	0
	3286	3731	1	0.853	221	3000-	30	0
période 1987-1997	6.07	6.63	8	0.148	4.41	0-10	206	9
	19.4	23.4	7	0.432	10.3	10-30	117	12
	42.7	42.4	7	0.118	18.8	30-50	143	7
	76.1	79.1	5	0.543	33.2	50-100	594	13
	120	121	5	0.463	28.5	100-150	403	14
	169	177	3	0.488	54.2	150-200	364	9
	243	285	2	0.504	89.6	200-300	472	4
	372	490	2	0.545	130	300-500	293	5
	623	882	2	0.350	263	500-750	116	0
	875	1106	1	0.073	291	750-1000	74	0
	1233	1396	1	0.509	268	1000-1500	145	0
	1714	1998	1	0.405	323	1500-2000	49	0
	2204	2544	1	0.463	164	2000-3000	37	0

Tableau 2.D.1 : Calage du modèle de propagation de débit entre Oualia, Manantali et Kayes

## Annexe 2-E

### Vérification du calage du modèle de propagation aval, et de l'étalonnage de Bakel

#### *Etalonnage de la station de Bakel*

On dispose pour Bakel d'une série de 362 jaugeages effectués entre 1950 et 1987, dont 340 ont pu être utilisés pour étalonner la station par la méthode du gradient limnimétrique, décrite en annexe 2-A. L'étalonnage utilisé dans le programme PROGEMAN est tiré du rapport suivant : «Etude de l'impact du barrage de Manantali sur le régime hydrologique du Sénégal au niveau de Bakel (J.C. Bader, ORSTOM, 1992). Deux étalonnages sont proposés pour Bakel dans ce document: le premier s'applique jusqu'en 1971 et le second à partir de 1972. Comme on le voit sur la figure 2-E-1, le débit est plus fort depuis 1972 qu'avant cette date, pour une même cote à l'échelle.

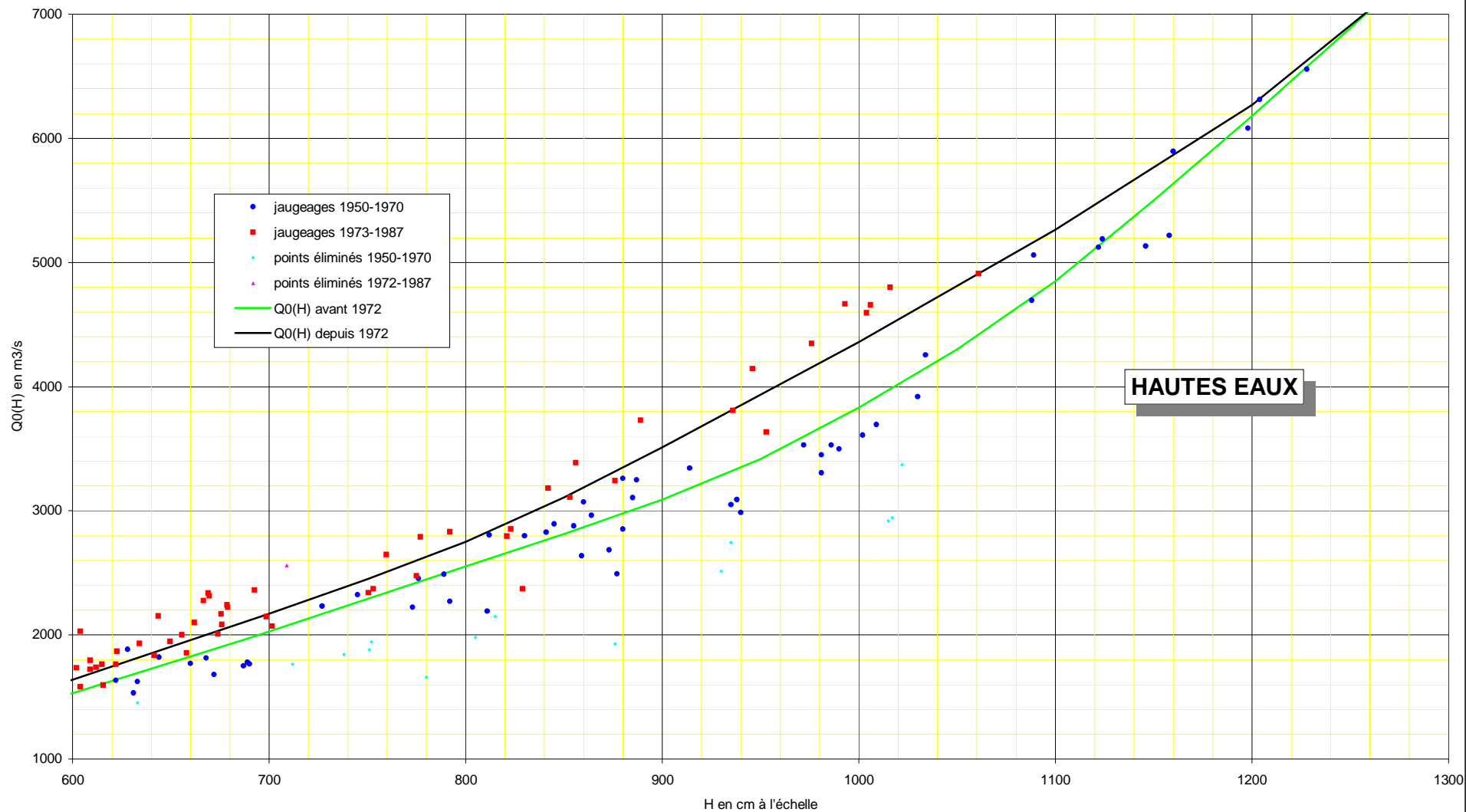
Lors de la présente étude, aucun élément nouveau ne nous a permis de remettre en cause ces étalonnages, qui s'appuient correctement sur les points jaugés. Seule une légère modification a été apportée en très basses eaux : les débits de l'ancien étalonnage ont été abaissés de moins de 2 m<sup>3</sup>/s en dessous de 25 m<sup>3</sup>/s, et ceux de l'étalonnage récent ont été rehaussés de moins de 1 m<sup>3</sup>/s en dessous de 10 m<sup>3</sup>/s. Cette modification est d'un ordre de grandeur beaucoup plus faible que le déficit de débit qui nous préoccupe pour Bakel. Elle affecte par ailleurs des débits bien plus faibles que ceux pour lesquels l'anomalie a été constatée. On comprendra donc qu'elle n'est signalée ici que pour mémoire, et qu'elle n'entraîne aucune conséquence sur l'analyse des causes possibles de l'anomalie. Le barème d'étalonnage de Bakel est présenté dans le tableau 2.E.1.

jusqu'en 1971	H (cm)	20	26	36	48	56	64	72	85	100	120	140	160	180
	Q0 (m <sup>3</sup> /s)	0	0,3	1	4	7,1	11	16	25	36	50,8	68	88	117
	H (cm)	210	240	280	320	350	380	440	510	590	690	800	850	900
	Q0 (m <sup>3</sup> /s)	164	225	318	430	514	610	845	1130	1480	1975	2550	2815	3090
depuis 1972	H (cm)	950	1000	1050	1100	1150	1200	1265	1300					
	Q0 (m <sup>3</sup> /s)	3415	3830	4300	4850	5500	6180	7100	7600					
	H (cm)	20	36	44	56	64	68	76	84	90	104	120	140	156
	Q0 (m <sup>3</sup> /s)	0	0,5	1	3	5	6,4	10	15	20	32,4	48	69	90
	H (cm)	170	190	204	226	250	280	300	336	375	410	450	500	550
	Q0 (m <sup>3</sup> /s)	112	147	175	220	280	360	417	527	650	780	945	1170	1400
	H (cm)	600	700	750	800	850	900	1000	1100	1200	1265	1300		
	Q0 (m <sup>3</sup> /s)	1640	2170	2450	2750	3110	3510	4360	5265	6270	7100	7600		

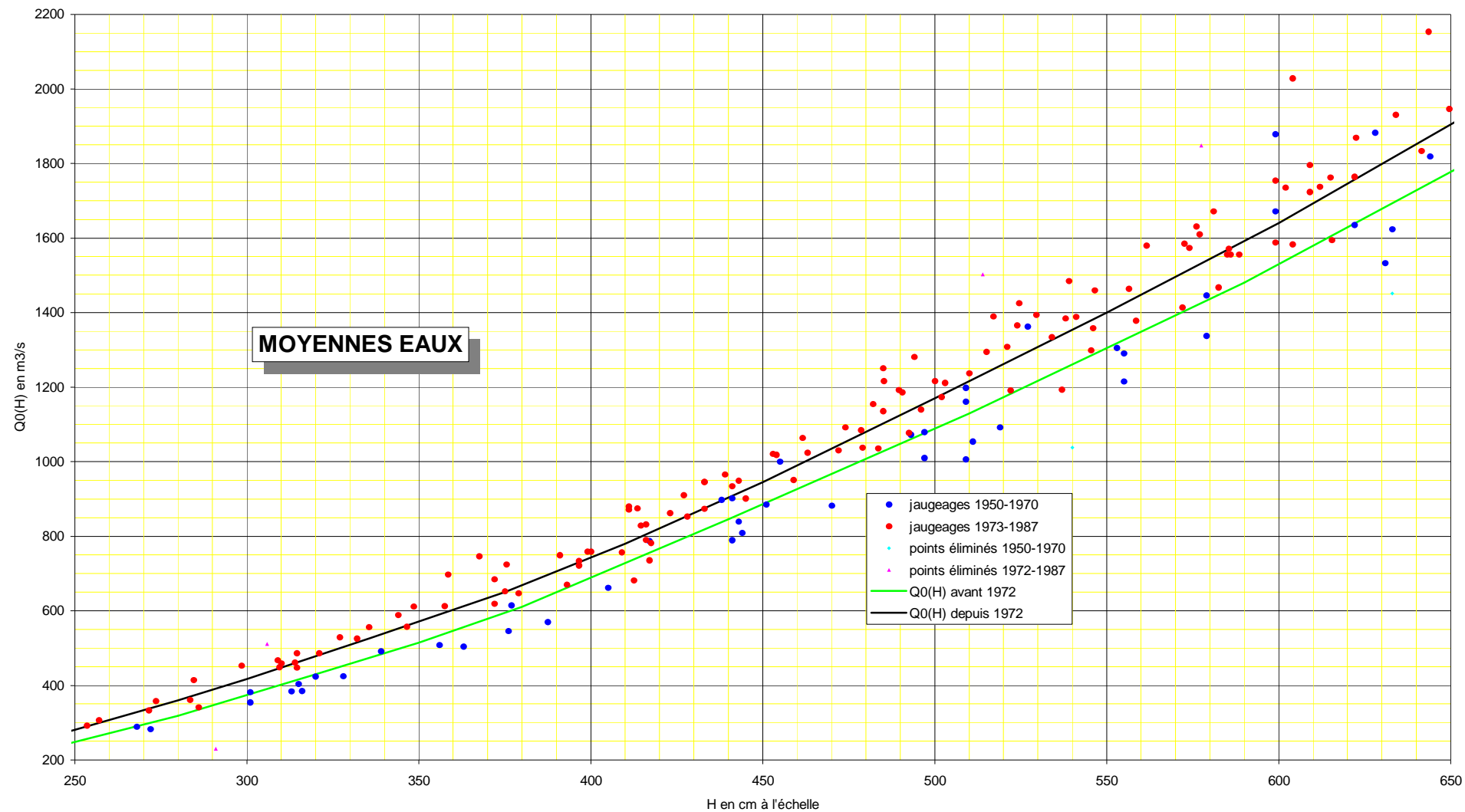
Tableau 2.E.1 :barème d'étalonnage de la station de Bakel, après modification des très basses eaux

Faute de jaugeages effectués depuis 1987, il est impossible de vérifier directement si un détamage est intervenu depuis cette date. Nous allons voir plus bas qu'on peut procéder de façon indirecte, en analysant la propagation des débits entre Bakel et les stations voisines.

### Station de BAKEL Etalonnage



### Station de BAKEL Etalonnage





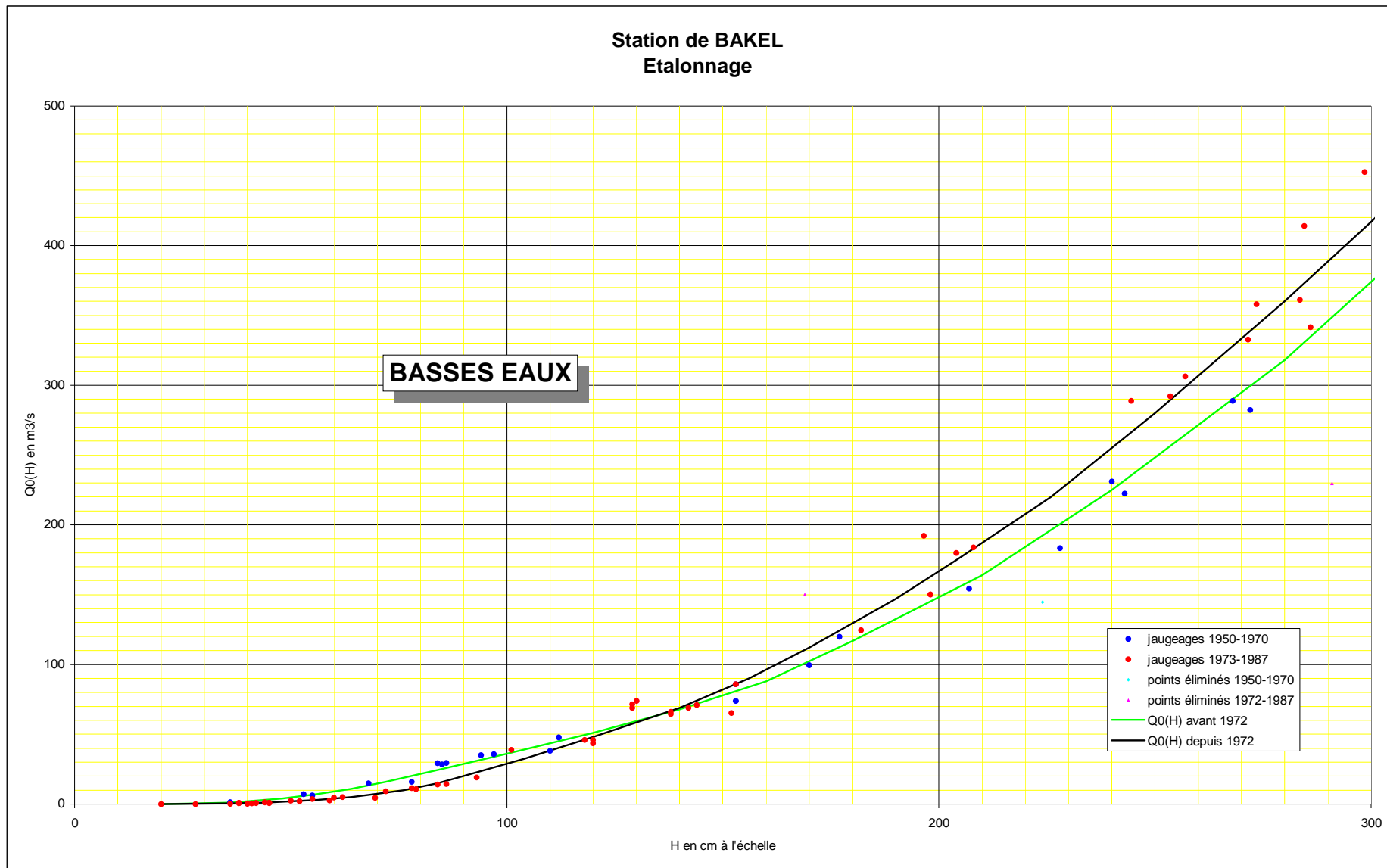


Figure 2.E.1 : courbes d'étalonnage de la station de Bakel en régime permanent, après modification des très basses eaux

## **Modèle de propagation aval**

### **Basses eaux**

Les paramètres du modèle de propagation aval (Kayes + Gourbassy -> Bakel) utilisés dans PROGEMAN, sont calés sur la période 1955-1985.

Sur l'ensemble des données disponibles de 1955 à 1997, la méthode du cumul des résidus met en évidence deux périodes de calage bien distinctes, situées de part et d'autre d'une période charnière s'étalant de 1988 à 1993 (voir tableau 2.E.2 et figures 2.E.2 et 2.E.3).

Schématiquement, pour une même somme de débits passant à Kayes et Gourbassy, la valeur obtenue à Bakel est plus faible d'environ 20 m<sup>3</sup>/s sur la période récente que sur la période ancienne pour les débits inférieurs à 250 m<sup>3</sup>/s. Inversement, elle est plus forte d'environ 100 m<sup>3</sup>/s pour les débits compris entre 500 et 2500 m<sup>3</sup>/s.

Le début du nouveau calage du modèle se situe en 1988 pour les débits de l'amont compris entre 20 et 50 m<sup>3</sup>/s, en 1991 entre 50 et 100 m<sup>3</sup>/s, et en 1993 entre 100 et 200 m<sup>3</sup>/s. On remarque tout de suite que ceci correspond grossièrement à la progression des soutiens d'étiage opérés depuis que Manantali est en fonctionnement.

Entre 1988 et 1990, les 50 m<sup>3</sup>/s ne sont largement dépassés que de façon épisodique entre janvier et mai ; en 1991, environ 60 m<sup>3</sup>/s sont maintenus pendant presque 6 mois d'étiage et à partir de 1992, les 100 m<sup>3</sup>/s sont régulièrement dépassés de façon durable.

On voit donc que l'anomalie de manque d'eau observée depuis Novembre 1997 perdure en fait depuis plusieurs années, pendant le soutien d'étiage.

Si l'anomalie de basses eaux était due à un détarage de la station de Bakel, nous devrions constater une anomalie inverse sur le modèle de propagation entre Bakel et Matam. Or c'est une anomalie de même nature que l'on constate en basses eaux : pour un même débit compris entre 40 et 250 m<sup>3</sup>/s à Bakel, le débit obtenu 3 jours plus tard à Matam est plus faible de presque 20 m<sup>3</sup>/s depuis 1988 qu'avant cette date. Il semble donc que l'hypothèse d'un détarage de la station de Bakel soit à écarter.

Le déficit de débit constaté à Bakel à partir de Kayes, et à Matam, à partir de Bakel, se manifeste en basses eaux depuis qu'on soutient l'étiage artificiellement.

L'anomalie pourrait s'expliquer de la façon suivante : en régime naturel, les débits compris entre 20 et 250 m<sup>3</sup>/s à Bakel s'observent principalement à la fin de la crue entre janvier et mars. Ils présentent une lente décroissance, caractéristique du régime de tarissement. L'essentiel de l'écoulement provient alors de la vidange du lit et des nappes qui ont été rechargées lors du passage de la crue.

Lors du soutien artificiel d'étiage, le plan d'eau est maintenu relativement haut dans le lit du fleuve pendant une longue durée. La vidange des nappes finit par ramener le niveau de celles-ci en dessous de la cote du fleuve, et c'est alors celui-ci qui réalimente la nappe, comme pendant la crue. Ces hypothèses sont à vérifier par des mesures.

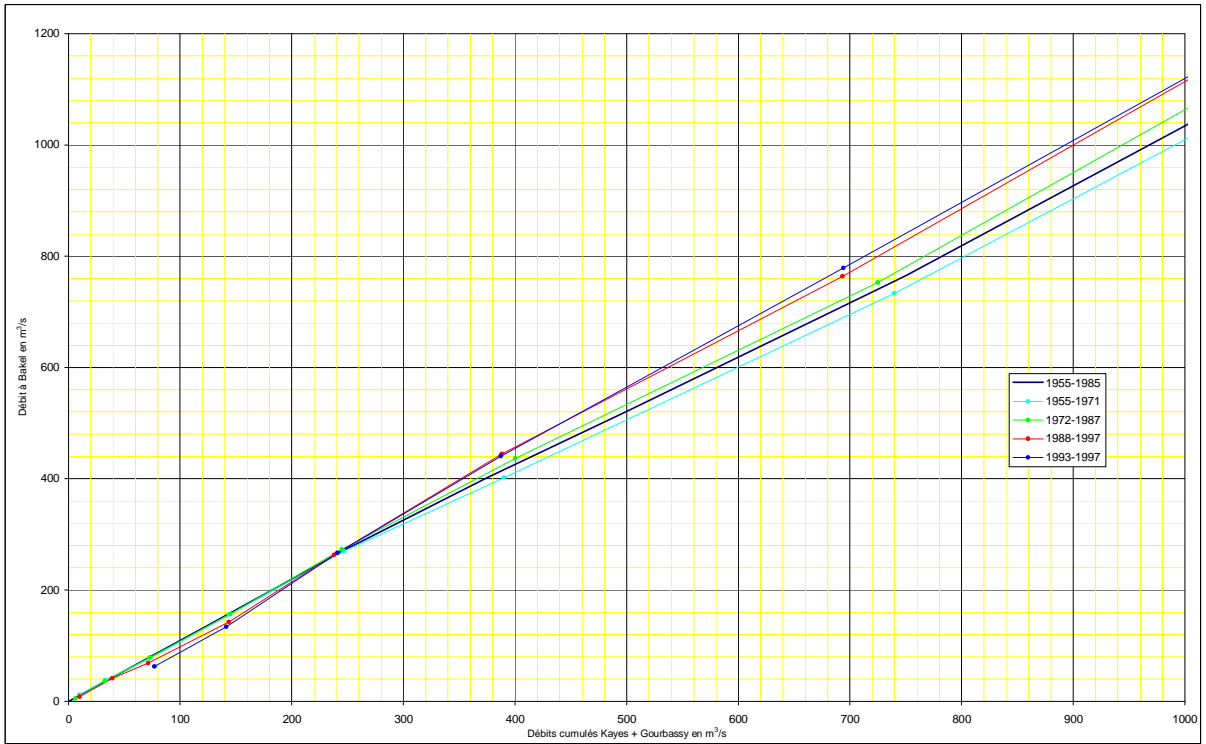
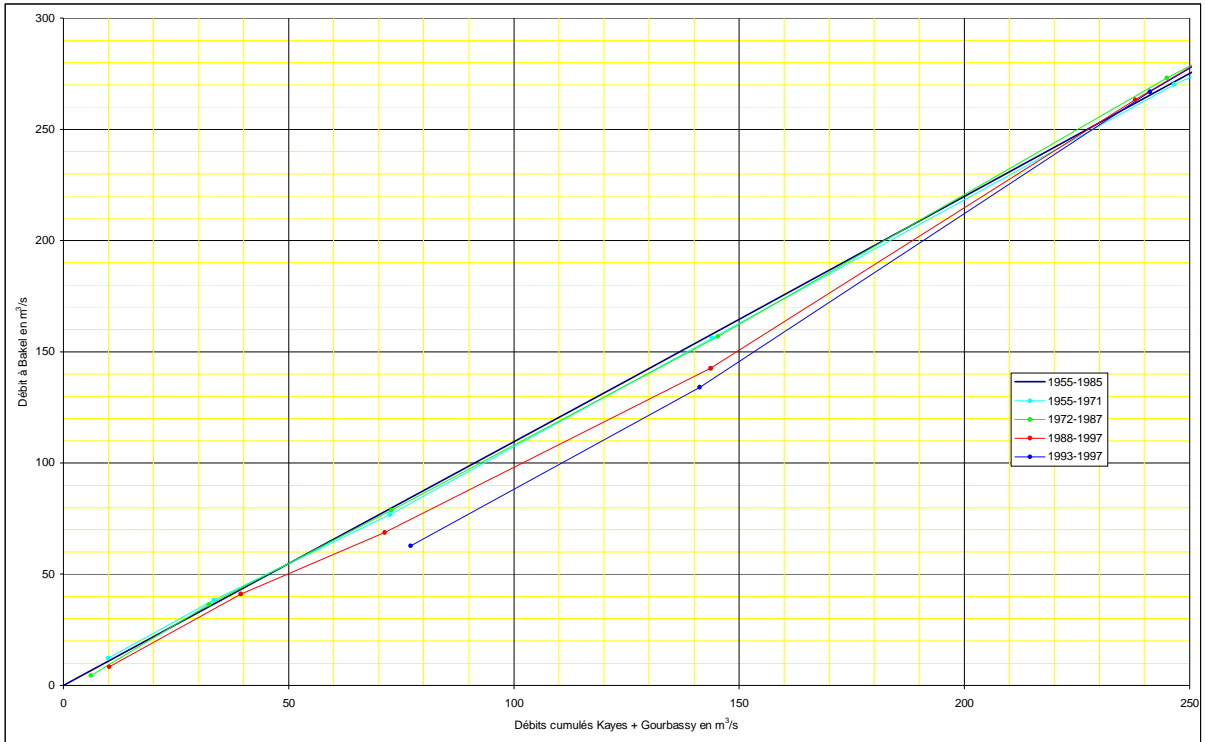
### **Hautes eaux**

Pour un débit amont compris entre 2200 et 4500 m<sup>3</sup>/s, le débit résultant à Bakel est plus important après 1972 qu'avant 1972. Ceci semble s'accroître dans les années (fig. 2.E.3). Ce phénomène pourrait être dû à une raréfaction de la végétation de berge, induisant une moindre rétention d'eau et un freinage plus faible de l'écoulement. Cette hypothèse doit, bien sûr, être vérifiée. Quoi qu'il en soit, il faut envisager la nécessité de modifier le calage de hautes eaux du modèle aval pour la gestion à opérer en 1998.

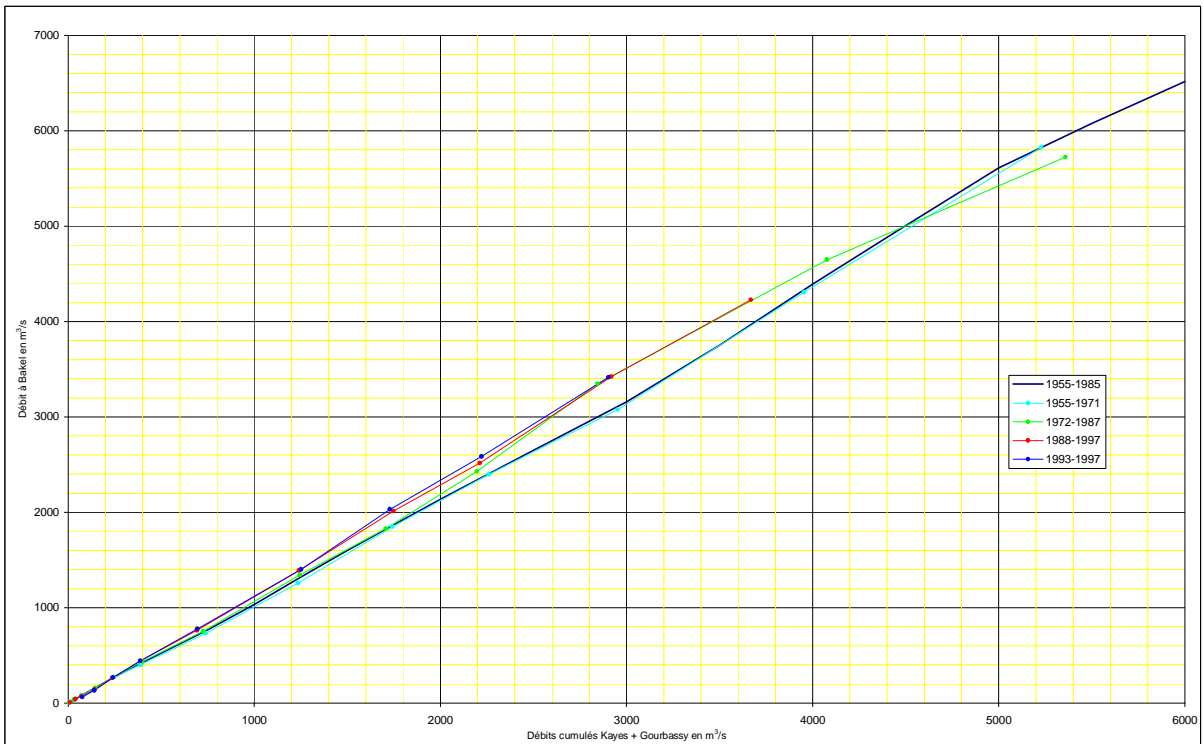
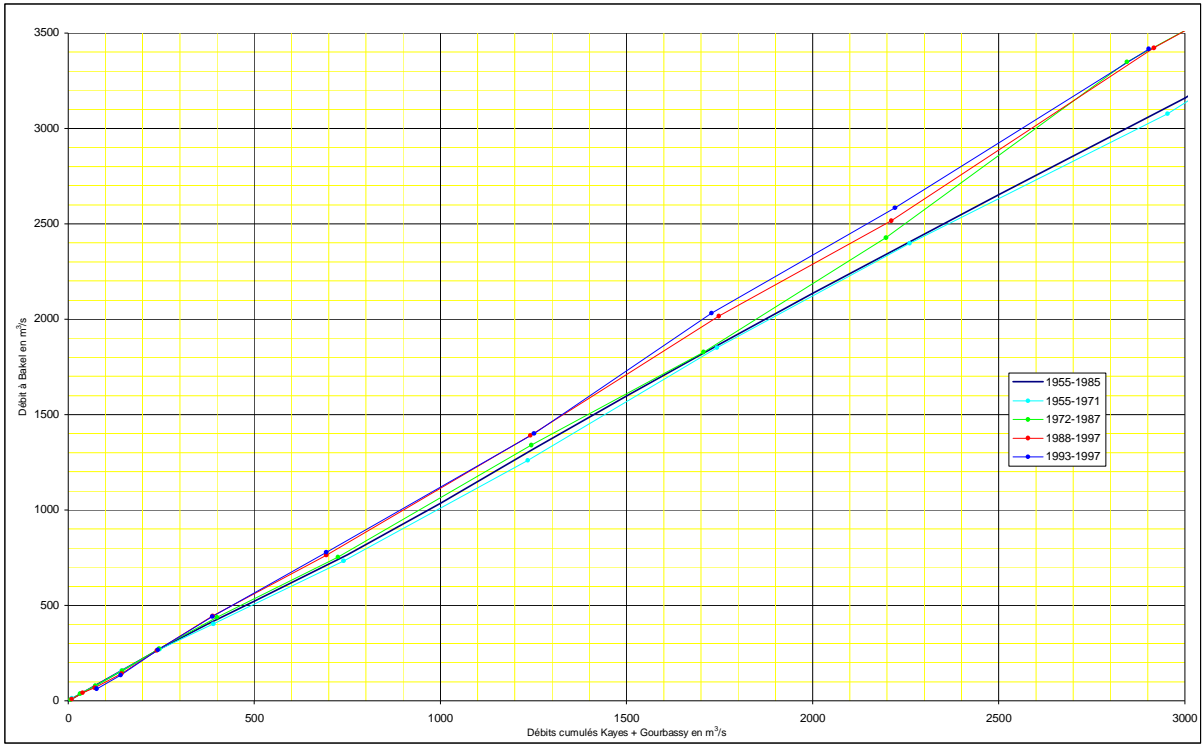
Remarque : Les débits observés à Bakel de Novembre 1995 à Juin 1996 ont été supprimés de l'échantillon analysé. En effet, ces débits, dont les variations apparaissent pourtant tout à fait plausibles à première vue, se révèlent anormalement élevés à la fois par rapport aux valeurs de Kayes et Gourbassy, et à celles de Matam.

	somme des débits au jour j à Kayes et Gourbassy	débit au jour j+D à Bakel	D : Temps de propagation	R : coefficient de corrélation	écart-type résiduel	plage de débit amont	taille de l'échantillon retenu	nombre de couples éliminés
	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)	(jour)		(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)		
période 1955-1971	9,97	12,2	3	0,860	3,58	0-20	661	7
	33,4	38,4	3	0,818	6,42	20-50	535	20
	72,5	76,8	2	0,774	10,7	50-100	443	1
	144	156,1	2	0,792	23,8	100-200	616	7
	246,6	270,1	2	0,596	40,8	200-300	376	1
	390,1	401,8	1	0,771	41,4	300-500	349	0
	739,9	733,4	1	0,935	52,6	500-1000	523	0
	1235	1259	1	0,857	96,4	1000-1500	340	1
	1743	1851	1	0,718	155,8	1500-2000	220	0
	2261	2398	1	0,522	206	2000-2500	224	1
	2954	3077	1	0,789	223,7	2500-3500	408	0
3954	4306	1	0,539	523,6	3500-4500	258	0	
5229	5825	1	0,726	479,7	4500-	179	0	
période 1972-1987	6,14	4,48	3	0,880	2,68	0-20	1680	62
	32,3	36,4	3	0,930	4,32	20-50	604	15
	72,8	78,7	2	0,714	13,4	50-100	424	3
	145,3	156,9	2	0,827	23,5	100-200	353	9
	245	273,1	2	0,563	50,7	200-300	227	7
	400,4	436,9	1	0,662	55,5	300-500	374	5
	725,1	752,5	1	0,919	59,9	500-1000	562	8
	1245	1340	1	0,797	122	1000-1500	371	2
	1707	1828	1	0,782	131,4	1500-2000	170	1
	2197	2427	1	0,655	179,3	2000-2500	54	0
	2845	3349	1	0,817	315,5	2500-3500	28	0
	4076	4649	1	0,682	420,2	3500-4500	11	0
	5359	5724	1	0,730	421,8	4500-	10	0
période 1988-1997	10,2	8,44	3	0,830	3,14	0-20	220	1
	39,4	41,1	3	0,865	5,33	20-50	245	5
	71,3	68,7	2	0,681	13,4	50-100	542	3
	143,7	142,6	2	0,817	24,4	100-200	586	6
	238	263,2	2	0,725	39,2	200-300	297	4
	388,5	444,2	1	0,742	65	300-500	383	8
	693,5	763,9	1	0,787	109,8	500-1000	294	12
	1241,9	1390,2	1	0,626	167,3	1000-1500	193	0
	1748,6	2015,4	1	0,660	166,1	1500-2000	111	0
	2212	2515	1	0,598	217,5	2000-2500	51	0
	2917	3421	1	0,758	253,3	2500-3500	57	0
3667	4228	1	0,996	19,8	3500-4500	3	0	
période 1993-1997	77,1	62,8	2	0,945	4,65	50-100	144	0
	141,3	134	2	0,869	18,1	100-200	385	0
	241,2	266,8	2	0,746	44,5	200-300	114	2
	387,4	440,9	1	0,767	64	300-500	191	2
	694,1	778,7	1	0,779	123,5	500-1000	144	3
	1252	1400	1	0,740	129,8	1000-1500	140	1
	1729	2032	1	0,753	158,4	1500-2000	66	0
	2221	2584	1	0,584	233	2000-2500	34	0
	2903	3416	1	0,729	252,5	2500-3500	43	0

Tableau 2.E.2 : calage du modèle de propagation de débit entre Kayes, Gourbassy et Bakel, sur différentes périodes



Figures 2.E.2 : calage du modèle de propagation aval sur différentes périodes, en basses et très basses eaux



Figures 2.E.3 : calage du modèle de propagation aval sur différentes périodes, en hautes et très hautes eaux

**ORGANISATION POUR LA MISE  
EN VALEUR DU FLEUVE  
SENEGAL**

**O.M.V.S.**



**L'Institut Français de  
Recherche Scientifique  
pour le Développement  
en Coopération**



# **ETUDES DE L'OPTIMISATION DE LA GESTION DES AMENAGEMENTS DE L'OMVS**

**CRUE 1997**

**ADDENDUM**

**République Française  
MISSION DE COOPERATION ET  
D'ACTION CULTURELLE  
DAKAR – SENEGAL  
M.C.A.C.**

avril 1998

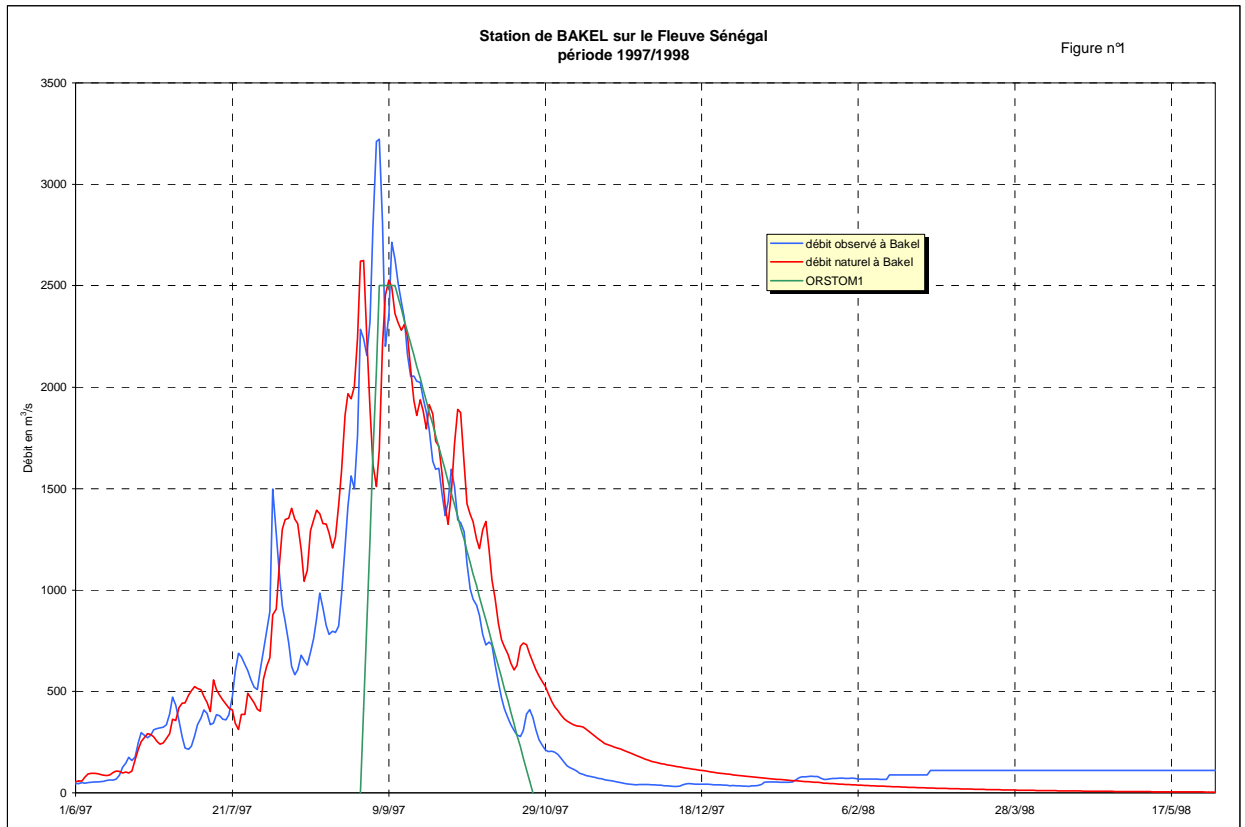
## PREMIERE PARTIE

### CRUE ARTIFICIELLE ET CRUE NATURELLE 1997 – 1998

#### 1. Débits 1997 - 98

La crue naturelle a été reconstituée à Bakel et Kayes à l'aide du modèle de propagation, à partir des débits entrant dans le barrage de Manantali au niveau de la station de Bafing Makana.

La figure n° 1 montre les variations relatives des débits entre le 1/06/1997 et le 31/05/1998 à la station de Bakel. Les débits de la fin de crue ont été établis en fonction des consignes données pour les lâchés du barrage jusqu'à la fin mai 1998.



L'écart entre débit naturel et artificiel a permis d'effectuer le remplissage partiel de la retenue de Manantali qui est passée de la cote 189,70 m le 1<sup>er</sup> juillet 1997 à 199,99 m le 7 décembre.

Le volume correspondant est passé de 4,404 Gm<sup>3</sup> à 7,696 Gm<sup>3</sup> durant la même période.

La figure n°2 montre les variations de la retenue entre le 1<sup>er</sup> juin 1997 et le 31 mai 1998.

La gestion a permis d'assurer une crue artificielle correspondant à l'hydrogramme « ORSTOM1 » et de conserver un volume supplémentaire de 1,559 Gm<sup>3</sup> dans la retenue par rapport au 1<sup>er</sup> juin 1997.

Même en cas de crue décennale sèche, ce volume permettra d'assurer une crue artificielle de même type que celle de 1997.

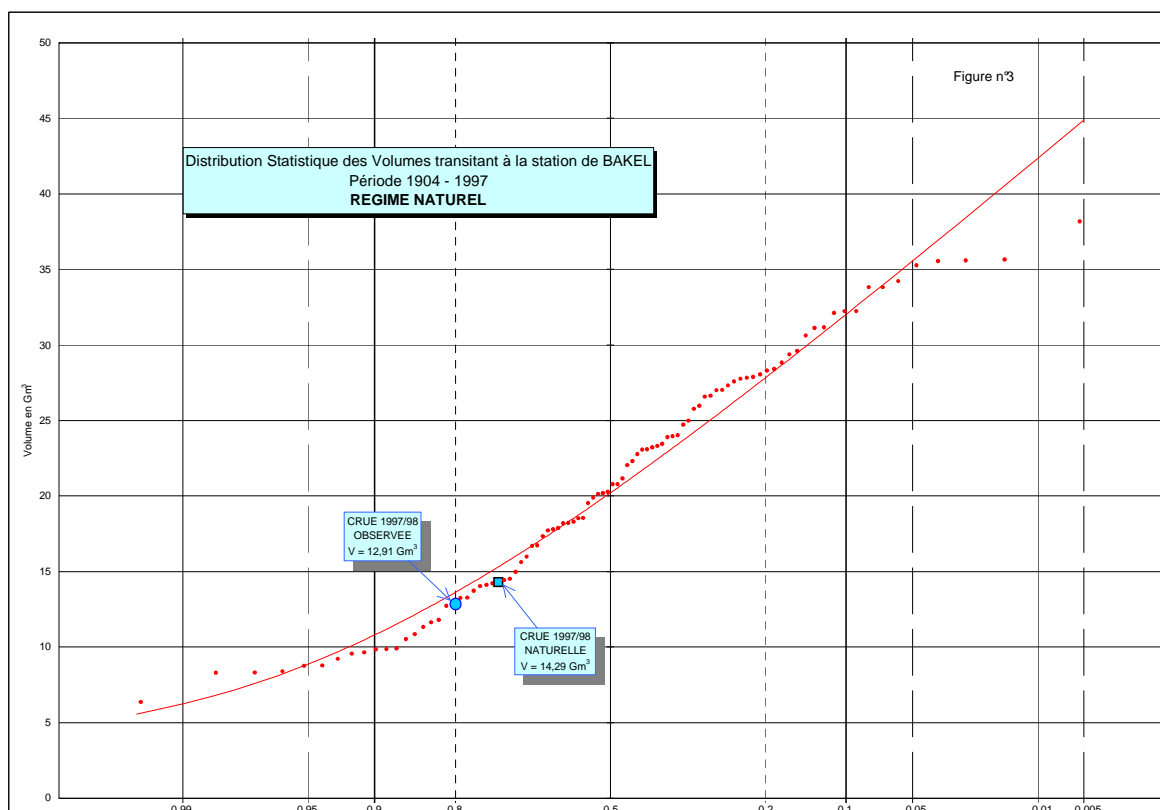
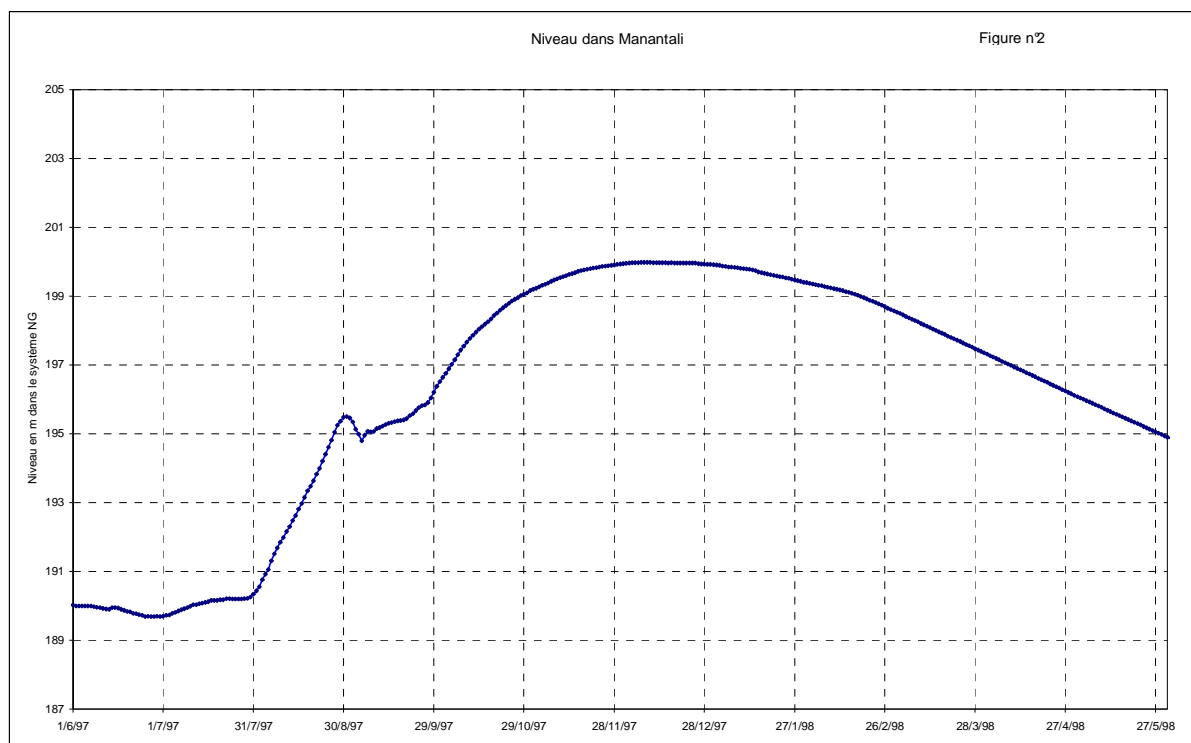
#### 2. Analyse statistique des volumes 1997 - 98

Le tableau n°1 contient les volumes ayant transités au droit des différentes stations situées dans les biefs compris entre le barrage de Manantali et celui de Diama.

Les volumes naturels ont été reconstitués à Kayes, Bakel et à l'aval en utilisant le modèle de propagation et les débits entrant dans la retenue observés à Bafing Makana.

Les débits ont été reconstitués à partir de ceux de Bakel. La reconstitution est issue de la méthode développée par Philippe Bois (Thèse d'état – Université de Grenoble – 1973) puis reprise par l'ORSTOM (J.C. Bader – Dakar - 1991), elle est basée sur une analyse des résidus.

A l'aide des débits journaliers, les volumes annuels ont été calculés du 1<sup>er</sup> juin au 31 mai de l'année suivante. Cette « année hydrologique » correspond sensiblement à une moyenne entre le haut bassin et l'estuaire du fleuve Sénégal.



L'analyse des volumes a été réalisée pour le régime naturel. Il n'est fait état ici que des volumes ayant transités au niveau de Bakel et de Bafing Makana. Dans le tableau synthétique qui suit (tableau n°2), les fréquences des crues de la Falé mé à Gourbassy et du Bakoye à Oualia ont été mentionnées.

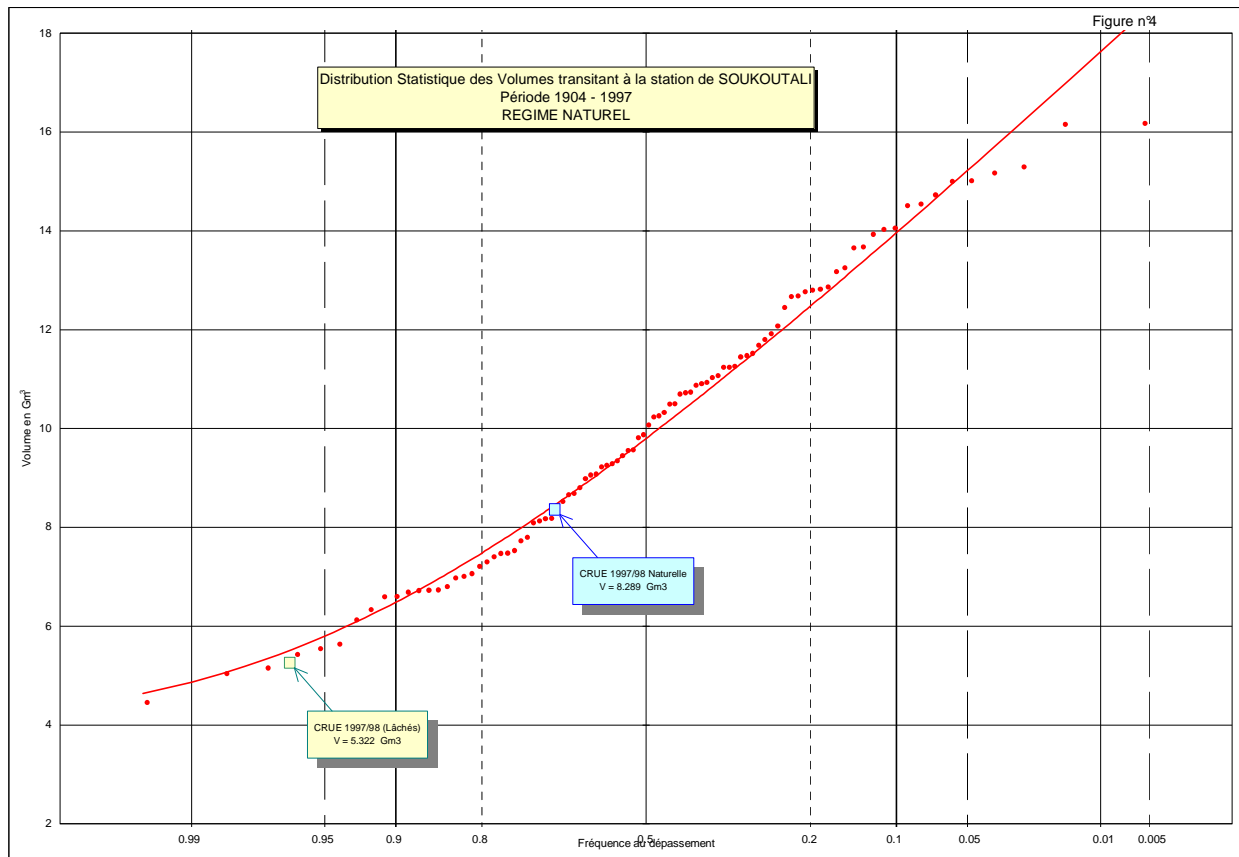


Volumes annuels écoulés en régime naturel (du 1/06 au 31/05 de l'année suivante)							
(Volumes exprimés en Mm <sup>3</sup> )							
	Dak. Saïd.	Kayes	Bakel	Soukoutali	Oualia	Makana	Gourbassy
1904	8566	18273	24978	10931	5065	8768	4933
1905	10401	22633	30048	13171	6459	10574	5898
1906	12023	27878	40212	15171	8093	13673	8006
1907	6902	13118	17729	8686	3382	6841	3367
1908	10134	22904	26304	12822	6481	10891	4795
1909	11482	26333	30680	14544	7451	12610	5655
1910	8468	18350	22966	10738	5135	8724	4353
1911	7303	14487	18136	9254	3864	7252	3275
1912	7287	14707	19101	9226	4002	7231	3660
1913	4116	6749	9004	5154	1438	3977	1577
1914	6448	12298	14552	8185	3143	6379	2478
1915	8297	17129	20588	10499	4711	8286	3698
1916	8914	19448	23350	11261	5532	9111	4294
1917	7460	16214	21539	9449	4585	7828	4185
1918	10845	24441	37331	13676	7124	12014	7755
1919	7204	14130	17983	9077	3758	7181	3382
1920	8801	19106	27834	11033	5428	9470	5730
1921	5953	11792	14279	7530	3168	5929	2532
1922	11663	27868	39330	14514	8360	14005	7766
1923	8586	18580	25659	10906	5124	8910	5150
1924	12793	30617	41769	16156	8966	14539	8271
1925	10039	22427	28271	12674	6422	10581	5486
1926	7744	14904	18104	9818	3876	7596	3212
1927	11076	25486	35449	14031	7441	12083	7214
1928	10059	23324	30408	12687	6701	11185	6005
1929	10136	22662	30070	12866	6399	10916	6076
1930	9088	19372	27755	11477	5499	9249	5639
1931	8913	18940	25027	11244	5308	9138	5090
1932	10113	22947	26004	12799	6563	10791	4457
1933	9877	22336	28365	12446	6390	10562	6057
1934	7943	17498	23150	10071	4953	8434	4665
1935	11760	28357	38416	14731	8444	13816	7897
1936	12022	29033	40518	15004	8656	14796	7022
1937	7362	15291	21396	9346	4261	7412	4451
1938	9100	20216	26840	11522	5750	9647	5767
1939	6823	13755	18929	8658	3725	6840	3856
1940	5838	10740	14910	7470	2664	5851	2890
1941	5299	9903	14090	6726	2594	5239	2925
1942	5777	11207	14609	7304	2939	5717	2383
1943	7333	15444	22255	9285	4458	7432	4391
1944	4841	8512	11115	6129	2104	4795	1890
1945	9454	22333	31165	11921	6427	10629	6181
1946	8479	18710	25053	10725	5350	8691	4709
1947	6436	12975	22504	8133	3626	6464	4795
1948	7784	16224	19496	9879	4391	7874	3583
1949	6425	13050	15986	8093	3513	6508	2969
1950	11154	26953	38075	14053	7906	12928	7604
1951	10046	21613	28902	12766	6229	10357	6094
1952	8622	17909	24484	10501	4905	9626	6252
1953	9523	17836	21761	11686	4353	10187	5009
1954	12316	27458	35686	15016	7845	14256	7091
1955	11419	26222	35088	13929	5542	13467	7016
1956	10029	23041	31911	12078	6530	11797	6148
1957	12731	26901	34554	15299	7618	15175	5590
1958	11239	26413	34226	13654	8148	12774	5900
1959	9023	19352	26521	11069	5374	10397	5024
1960	8296	16519	21613	10263	4784	8879	4097
1961	9013	23190	31292	11450	9639	10976	5851
1962	8876	19080	26143	10873	6912	9938	5471
1963	8474	17441	23056	10325	3781	9920	4612
1964	9711	23994	32476	11800	7783	11678	6399
1965	9155	24283	34894	11240	6979	10325	6402
1966	8751	20860	28521	10698	6982	10441	5900
1967	12277	25980	35039	16178	7115	15831	6421
1968	5762	12042	13910	7407	3981	6338	1910
1969	9970	20876	26240	13255	6438	11702	4382
1970	7070	14721	18464	9569	3657	8940	3501
1971	6202	15528	20113	8803	5249	7649	3987
1972	6413	8116	9722	7482	1182	6749	1304
1973	5791	10661	13624	7212	2495	6327	1906
1974	7581	16662	23850	10237	5747	9298	4148
1975	6690	13203	18491	8988	3270	7722	3511
1976	7924	11593	14198	9559	2801	7863	2100
1977	3918	7319	9773	5041	2110	4040	1925
1978	6299	10762	15134	7725	2282	6426	3091
1979	4305	7226	9341	5428	1257	4447	1343
1980	5522	9050	11914	7007	1603	5922	2237
1981	5711	9396	13068	6798	1457	5751	2311
1982	4605	7243	9404	5544	1481	4719	1692
1983	5728	5651	6744	6974	435	5933	602
1984	3520	5547	6695	4456	954	3670	863
1985	5110	8293	10901	6337	1350	5256	1473
1986	5354	8171	10425	6596	1092	5484	1517
1987	5423	7442	8782	6737	622	5472	925
1988	5751	11121	14207	7068	3521	6220	2285
1989	5336	8383	11804	6604	1614	5594	2754
1990	5409	7955	9907	6723	1176	5754	1477
1991	6613	10306	12880	8177	1830	7080	1922
1992	5380	8173	9573	6691	1375	5747	943
1993	4539	6936	8763	5638	1264	4796	1363
1994	7287	13881	18223	9059	4172	8966	3290
1995	6568	12939	16724	8522	3741	7570	2808
1996	6202	10493	13256	7802	2383	6800	1993
1997	6545	10877	14289	8289	2288	7170	2538
Moyenne	7681	16684	20903	9630	4279	8481	3923

Tableau n°1

La même analyse a été réalisée pour toutes les stations. Elle est basée sur l'ajustement d'une loi exponentielle généralisée à asymétrie positive pour chaque échantillon de volume annuel (période 1904 à 1997), soit, dans chaque cas 94 valeurs.

Les figures n3 et n4 montrent les ajustements réalisés et la position des crues artificielles et naturelles à Bakel et à Bafing Makana.



Les deux figures 2 et 3 ci-dessus sont graduées en fréquence au dépassement.

Le tableau synthétique n2 de la page suivante contient une comparaison des volumes transités au droit des différentes stations.

Il est montré dans ce tableau que la crue 1997/98 est une crue relativement faible surtout si on la compare à la série la plus longue observée (1904-1998).

A Manantali, le volume naturel est dépassé 2 années sur 3, le volume relâché est dépassé 19 fois sur 20.

A Bakel, la crue naturelle est dépassée 3 fois sur 4 et en régime artificiel, 4 fois sur 5 pour le volume annuel. En fait, la forme de la crue artificielle a été très améliorée car elle a supprimé deux pointes de crues très marquées qui auraient été très préjudiciables aux cultures de décrue. De plus la gestion artificielle aura permis de débiter l'hivernage 1998 avec une réserve supplémentaire de 1.6 Gm<sup>3</sup> qui permettra d'assurer la crue artificielle en cas de besoin.

Dans le tableau n1, il apparaît que la fréquence des crues sur les différents affluents est sensiblement la même, seuls les débits intermédiaires ont été relativement forts par rapport aux débits moyens de la période de calage du modèle de propagation.

L'étude des apports intermédiaires a permis, dès à présent, d'introduire pour la crue 1998 un module de correction automatique, mais il devient nécessaire de vérifier les courbes d'étalonnage des stations amont, plus particulièrement le tarage des vannes de l'aménagement.

Le commentaire des écarts des apports intermédiaires est présenté en 3<sup>ème</sup> partie du présent addendum.

### 3. COUVERTURE SPOT DE LA VALLEE PENDANT LA CRUE

Un contrat a été passé entre l'OMVS et le bureau d'études BRL pour la programmation, la commande et l'interprétation d'images SPOT prises à deux semaines d'intervalles, fin septembre et début octobre 1997. Les dates de prises ont été proposées par l'ORSTOM, d'une part entre le 20 et 25 septembre, puis entre le 5 et 10 octobre.

Une troisième série d'image a été prise en février (date inconnue à ce jour) afin que son interprétation permette d'évaluer les surfaces mises en culture de décrue avec une maturation des récoltes menée à bien.

Les résultats des deux premières campagnes nous sont parvenues très tardivement, début mai, alors que la remise des interprétations à l'OMVS était prévue 4 mois après les prises de vue, soit en janvier 1998. Des retards dans la fourniture des bandes numériques par la société SPOT IMAGE seraient à l'origine de la livraison hors délais.

Cinq cartes sont présentées dans les pages qui suivent ; elles montrent l'étendue de la mise en eau des cuvettes lors des deux séries de prises de vue. Il s'agit là de montages, chacune des cartes étant réalisée à partir d'images unitaires prises à des dates différentes au sein de la même période de prise de vue.

L'ORSTOM a commencé à installer un SIG, supporté par le logiciel AECVIEW 30. Les images transmises par BRL ont été introduites dans ce SIG afin de faciliter leur interprétation. Ce logiciel permet, en effet, d'effectuer des requêtes sur des thèmes déterminés, en particulier de connaître les surface inondées dont les contours ont été vectorisés préalablement, ce qui est prévu dans le contrat BRL.

Les cartes 1 et 2 présentent des montages de l'ensemble des images pour chaque série de prises de vues, les deux cartes suivantes contiennent des détails de la zone de PODOR, en septembre, près du maximum de la crue et en octobre à la décrue. Ces deux cartes montrent le traitement adopté (bordures des zones inondées en bleu foncé).

A ce jour nous n'avons pas connaissance des zones réellement submergées (environ 36 000 ha dans la zone de Podor ?), il semble, à première vue que le bief Saldé – Dagana ait été inondé comme prévu, c'est-à-dire comme une crue optimisée doit le faire. L'interprétation des surfaces cultivées permettra de mieux connaître la réalité des résultats de la crue 1997.

L'interprétation effectuée au laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM, à Dakar, a permis d'évaluer les surfaces inondées au moment de la saisie des images par le satellite SPOT (pour la zone comprise entre Matam et Dagana) :

- Fin septembre : **76 395 ha**
- Début octobre : **61 087 ha** auxquels il faut ajouter **61630 ha** identifiés comme des zones ayant été submergées suffisamment longtemps pour convenir à des cultures de décrues. Ces zones ont été isolées par le bureau d'étude chargé de la télédétection.

Bilan des écoulements sur le haut bassin du Sénégal entre le 01/06/97 et le 31/05/98\*

cours d'eau		Bafing		Bakoye	Falémé	Sénégal		Intermédiaires		lac de Manantali
station		Makana	Manantali	Oualia	Gourbassy	Kayes	Bakel	Manantali - Oualia/Kayes	Gourbassy-Kayes/bakel	pertes par évaporation***
régime observé		7170	5322	2288	2538	9272	12906	1662	1096	407
régime naturel reconstitué		7170	8289	2288	2538	10877	14289	300	874	0
différence		0	-2967	0	0	-1605	-1383			407
Fréquence au dépassement du volume écoulé en régime naturel	période 01/06/04 - 31/05/98	0.654					0.729			
	période 01/06/50 - 31/05/98	0.552	0.552	0.635	0.573	0.594	0.573			
	période 01/06/70 - 31/05/98	0.268	0.268	0.375	0.304	0.304	0.268			
Fréq. au dép. en régime artificiel (1997) par rapport au régime naturel **	période 01/06/04 - 31/05/98	0.654	0.967	0.635	0.573		0.803			
Moyenne du volume écoulé naturel	période 01/06/04 - 31/05/98	8481	9630	4279	3923	16694	20903			
	période 01/06/50 - 31/05/98	8424	9346	3984	3604	14909	19680			
	période 01/06/70 - 31/05/98	6334	7324	2229	2136	9916	12867			

\*\*Fréquence rapportée à l'analyse du régime naturel

Volume d'eau présent dans la retenue de Manantali, en Mm<sup>3</sup>

volume au 31/05/97	4510
volume au 31/05/98	6069
différence	1559

Volume des apports intermédiaires, déduit des tableaux ci-dessus

Zone intermédiaire	à partir des valeurs observées	à partir des valeurs du régime naturel reconstitué
entre Manantali, Oualia et Kayes	1662	300
entre Kayes, Gourbassy et Bakel	1096	874

\*L'analyse a été menée à partir des données journalières, connues jusque mi-décembre 97 ou mi-février 98 selon les stations, et extrapolées ensuite jusque fin mai 98 à partir des objectifs annoncés pour le soutien d'étiage, et par modèle de tarissement.

\*\*\* Les pertes par évaporation sur le lac de Manantali ont été estimées à partir de la superficie variable du lac et des taux moyens d'évaporation nette mensuels indiqués par Gibb (1987). Du 01/06/97 au 31/05/98, elles varient entre +34 (mars 98) et -24 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (août 97)

Tableau n°2

**Carte n°1**

**Carte n2**

**Carte n°3**

**Carte n°4**





## **DEUXIEME PARTIE**

### **COMPARAISON DE TROIS SCENARIOS DE GESTION DU BARRAGE DE MANANTALI**

**(Périodes 1950 – 1998 et 1970 – 1998)**

#### **1. OBJECTIF DE L'ETUDE**

L'objectif de cette étude est de faire une comparaison des performances potentielles du barrage de Manantali, selon trois scénarios de gestion envisagés pour cet ouvrage.

Le scénario A suppose que les lâchés du barrage visent essentiellement à satisfaire les besoins de l'agriculture irriguée, et de l'agriculture de décrue. Dans ce cas, l'usine hydroélectrique est utilisée comme une centrale au fil de l'eau, à la différence près suivante : les débits utilisables par la centrale hydroélectrique ne sont pas déterminés directement à partir des apports amont, mais à partir des lâchés effectués au barrage pour la satisfaction des autres besoins.

Le scénario B envisage la production d'une puissance électrique donnée, quand elle est possible, et la fourniture destinée à l'irrigation.

Le scénario C suppose que les trois principaux objectifs de l'ouvrage sont pris en compte ; fourniture d'eau pour l'irrigation, production électrique et soutien de crue destiné à permettre l'agriculture de décrue.

La comparaison des performances potentielles de l'ouvrage porte sur l'énergie électrique produite, ainsi que sur la surface cultivée en décrue grâce à l'inondation du lit majeur entraînée par la pointe de crue du fleuve. Ce sont en effets ces deux objectifs (production électrique et soutien de crue) qui s'avèrent être très concurrentiels dans le contexte de faible hydraulité que l'on connaît maintenant depuis environ 25 ans sur le bassin du Sénégal. La fourniture d'eau pour l'irrigation ne pose quant à elle pratiquement aucun problème puisqu'elle peut être assurée en permanence sans beaucoup pénaliser la production électrique, nécessitant des débits suffisamment faibles pour pouvoir être tous turbinés.

#### **2. METHODE**

La méthode consiste à effectuer une simulation numérique de la gestion du barrage. Les calculs, effectués au pas de temps journaliers et en avenir inconnu (ou connu 10 jours à l'avance seulement, voir plus bas), sont basés sur les données de débits naturels obtenus sur certaines stations du haut bassin du Sénégal. En effet, faute de certitude sur l'évolution du climat, le régime hydrologique naturel observé jusqu'à présent reste encore la meilleure prévision possible que l'on peut faire du régime futur.

Les simulations sont faites sur la période 1950-1997 qui compte pour environ 50% de bonne et 50% de mauvaise hydraulité, puis sur la période 1970-1997 qui compte essentiellement des années de mauvaises hydraulité. Elles permettent de voir quelles auraient été les performances de l'ouvrage si celui-ci avait existé depuis 1950.

On rappelle ci-dessous le principe des modèles utilisés dans les simulations, ils ont tous été développés à l'ORSTOM Dakar.

##### **2.1 Modèle de propagation de crue de LAMAGAT**

Une analyse de propagation des débits pour le haut bassin et des cotes pour la vallée (à l'aval de Bakel), a permis de mettre au point un modèle statistico-déterministe de transfert des ondes de crue (Lamagat, 1989), calé sur des données du régime naturel.

En débit, il consiste à établir la relation permettant de passer du débit  $Q_{amont}$  d'une station à un instant  $t$ , au débit aval  $Q_{aval}$  qui en résulte à une station située à l'aval, au temps  $t+dt$ .

Pour déterminer les relations  $Q_{aval}(Q_{amont})$  et  $Dt(Q_{amont})$ , on calcule à partir de données observées, par tranches de valeurs de  $Q_{amont}$  et pour différentes valeurs de  $Dt$ , les régressions linéaires entre  $Q_{amont}(t)$  et  $Q_{aval}(t+Dt)$ . Pour chaque tranche on retient la valeur moyenne de  $Q_{amont}$ , la valeur de  $Dt$  qui donne l'écart moyen minimum entre valeurs observées et débits calculés, ainsi que la valeur correspondante de  $Q_{aval}$  calculée.

Les relations ainsi établies de façon statistique entre stations successives, prennent en compte à la fois l'amortissement moyen des ondes de crues, les pertes (évaporation, infiltration) et autres prélèvements moyens et, dans le cas des écoulements non filaires observés dans la vallée, la répartition des débits dans les différents bras du fleuve.

Cette méthodologie de modélisation a fait l'objet d'une publication (Hubert J. MOREL-SEYTOUX - Hussam FAHMY - Jean-Pierre LAMAGAT - «A COMPOSITE HYDRAULIC AND STATISTICAL FLOW-ROUTING METHOD» - WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 29, N2, PAGES 413-418, février 1993).

## 2.2 Modèle de gestion de la retenue de Manantali : SIMULSEN

Ce modèle, (Bader, 1991) a été réalisé pour permettre d'évaluer l'effet de certaines règles de gestion du barrage de Manantali sur le degré de satisfaction de différents objectifs assignés à l'ouvrage. Le principe de l'évaluation consiste dans un premier temps à simuler numériquement un mode de gestion de la retenue, en calculant ce qu'il en résulte en matière de propagation de débit (jusqu'au niveau de Bakel, à l'aide du modèle de propagation de Lamagat), d'évolution du niveau de la retenue et de production d'électricité. Dans un second temps, les chroniques de débits, de cotes et de production électrique ainsi élaborées, sont analysées de façon statistique pour déterminer le taux de satisfaction des différents objectifs exprimés.

Les simulations sont faites au pas de temps journalier, sur la base des chroniques de débits de la banque de données homogénéisées du haut bassin du Sénégal (Bader, 1990). Chaque calcul est mené pour une combinaison de contraintes et de règles de gestion, choisies parmi la liste suivante et affectées de rang de priorité :

- Respect des limites physiques imposées sur les lâchés par les dimensions des organes d'évacuation du barrage, et respect du niveau maximal admissible pour la sécurité de la retenue (ceci constitue une contrainte de gestion, retenue en première priorité pour toutes les simulations prenant en compte le barrage).
- Laminage des crues, au niveau de Bakel ou à la sortie de la retenue.
- Demande de production électrique.
- Satisfaction de différents types de besoins en eau (irrigation, navigation, alimentation des centres urbains, agriculture de décrue) exprimés en débit au niveau de Bakel.

Chacune de ces consignes permet de définir soit une limite minimale  $Q_{min}$ , soit une limite maximale  $Q_{max}$ , soit les deux, pour le débit total à lâcher du barrage dans la journée (vidangé + déversé + turbiné).

Pour la plupart, ces limites correspondent soit aux valeurs de débit lâché – notées  $Q_{mina}$  ou  $Q_{maxa}$  – permettant de satisfaire directement la demande associée (c'est par exemple le débit dont la propagation, associée à celle du Bakoye à Oualia et de la Falémé à Gourbassy, produit au niveau de Bakel le débit à atteindre ou au contraire à ne pas dépasser), soit aux valeurs – notées  $Q_{minb}$  ou  $Q_{maxb}$  – qui ramènent la cote du lac au niveau de stock ou de revanche nécessaire pour garantir la possibilité de satisfaire la demande associée avec un certain niveau de risque d'échec dans le futur.

A chaque pas de temps, l'application successive des différentes règles par ordre de priorité décroissante, se traduit par le resserrement d'une fourchette de valeurs limites pour le débit total à lâcher. Ceci jusqu'à ce que toutes les règles aient été prises en compte, ou que l'une d'elles, incompatible avec les limites fixées par les règles précédentes, resserre la fourchette en une valeur unique. Finalement, la limite inférieure de la fourchette est retenue pour le débit à lâcher.

L'ensemble des paramètres intervenant dans les calculs :

- caractéristiques des organes du barrage et du lac,
- modèle de propagation de débit, besoins en eau exprimés au niveau de Bakel, limnigrammes limites à respecter dans le lac,
- liste des stations hydrométriques équipées de limnigraphes télétransmetteurs où les débits sont connus en temps réel)

est géré par l'utilisateur du logiciel.

Une procédure particulière (Bader, 1992-a) permet d'élaborer des limnigrammes de cote limite à respecter dans le lac, correspondant à certain niveaux d'échec pour la satisfaction des différents objectifs. Ces limnigrammes peuvent être utilisés directement en tant que consignes de gestion, pour le calcul des limites  $Q_{maxb}$  ou  $Q_{minb}$  définies plus haut.

### 3. DETAIL DES CONSIGNES DE GESTION ENVISAGEES

- 1) Respect d'un débit réservé de  $50\text{m}^3/\text{s}$  à la sortie du barrage du barrage. [Qmina]
- 2) Lâché d'eau pour garantir un débit minimal réservé à Bakel, destiné à l'irrigation. Celui-ci vaut  $200\text{m}^3/\text{s}$  si le niveau du lac est supérieur ou égal à 195 m IGN, et  $100\text{m}^3/\text{s}$  sinon. [Qminb]
- 3) Préservation du niveau du lac. Quand le niveau du lac est inférieur ou égal à 195 m IGN, les lâchés sont limités à la borne supérieure de la fourchette déterminée à partir des règles de priorité supérieure. [Qmaxa]
- 4) Laminage des crues du Sénégal à Bakel à  $4\,500\text{m}^3/\text{s}$  en débit journalier. [Qmaxa]
- 5) Préservation d'une revanche de sécurité dans le lac, garantissant un niveau d'échec de 1 année sur 50 pour le laminage envisagé. [Qminb]
- 6) Production d'électricité : on lâche un débit permettant de produire soit 90 MW si la cote du lac est supérieure à 182 m IGN, soit la maximum productible si la cote dépasse le seuil de déversement du barrage. La puissance installée envisagée atteint cinq fois 40 MW. [Qmina]
- 7) Soutien de crue à date variable [Qmina], envisageant une prévision à 10 jours des débits passant à Oualia et Gourbassy. L'hydrogramme de crue retenu, de volume quasi identique au « GIBB A », est noté « ORSTOM1 ». Il est défini comme suit au niveau de Bakel ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) :

0 le jour 0                      2 500 le jour 6                      2 500 le jour 11                      0 le jour 55

Bien que très rapide ( $417\text{m}^3/\text{s}/\text{jour}$ ), l'augmentation de débit envisagée pendant les six premiers jours de cet hydrogramme trapézoïdal est acceptable car elle correspond à une progression observée environ une année sur trois en régime naturel entre 1950 et 1970. Elle est indispensable, compte tenu du court délai de prévision envisagé (10 jours), pour que le soutien de crue puisse être optimisé.

Les règles adoptées pour le déclenchement du soutien de crue sont expliquées ci-dessous. Dans un but d'économie d'eau, elles visent à faire coïncider autant que possible le soutien avec une pointe importante de débit sur les branches non contrôlées du Sénégal : Falémé et Bakoye.

#### 3.1 Etat d'alerte au soutien de crue

Cet état d'alerte désactivé au début de chaque année, ainsi qu'à la fin de tout soutien de crue, est réactivé dès que la somme des débits moyens pentadaires centrés prévus à Oualia et Gourbassy à l'horizon 8 jours dépasse le seuil D1 correspondant.

Ceci donne pour le jour  $j$ , si l'alerte n'est pas encore active :

$$\bar{Q}_0(j+8) + \bar{Q}_g(j+8) > D1(j+8) \Rightarrow \text{Alerte activée le jour } j$$

Le seuil D1 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) varie linéairement de la façon suivante : 2100 du 1<sup>er</sup> janvier au 12 août ; 1100 le 22 août ; 565 le 1<sup>er</sup> septembre ; 500 du 6 septembre au 31 décembre.

#### 3.2 Lancement du soutien de crue

Si l'alerte au soutien de crue est active au jour  $j-1$ , le soutien est lancé le jour  $j$  si le débit moyen pentadaire diminue entre les jours  $j+7$  et  $j+8$  à Oualia et Gourbassy, ou si le jour  $j+8$  est postérieur au jour D2 (1<sup>er</sup> septembre) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{alerte active le jour } j-1 \\ \left\{ \left[ \bar{Q}_0(j+8) + \bar{Q}_g(j+8) < (\bar{Q}_0(j+7) + \bar{Q}_g(j+7)) \right] \text{ ou } [(j+8) > D2] \right\} \end{array} \right\} \Rightarrow \text{début de soutien le jour } j$$

Dans ce cas, les lâchés du barrage sont ajustés à partir du jour  $j$  pour obtenir l'hydrogramme ORSTOM1 à Bakel, calé de façon que le premier des 6 jours de palier de débit à  $2\,500\text{m}^3/\text{s}$  tombe le jour  $j+8$  à cette station.

#### 4. SCENARIOS DE GESTION ENVISAGES

Les trois types de gestion sont simulés avec les consignes suivantes, classées par ordre de priorité décroissante :

GESTION A : consignes 1 ; 2 ; 4 ; 5 ; 7	:	centrale au fil de l'eau
GESTION B : consignes 1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6	:	pas de soutien de crue
GESTION B : consignes 1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	:	gestion multi-objectifs

*Remarque 1* : L'usine hydroélectrique est supposée produire pendant les trois cas le maximum productible avec le débit lâché (turbiné + vidangé + déversé) déterminé à partir de l'ensemble des consignes.

*Remarque 2* : Dans le cas de gestion A, où n'apparaît aucune consigne relative à la production électrique, on suppose que l'usine produit la puissance maximale productible si le niveau du lac dépasse le seuil de déversement, même si cela entraîne un lâché total supérieur à celui qui est déterminé à partir des consignes 1, 2, 4, 5, et 7.

*Remarque 3* : Chaque simulation est initialisée (le 1<sup>er</sup> janvier 1950 ou 1970) avec un niveau atteignant 208,05 m IGN dans le lac, soit la limite de débordement.

#### 5. EVALUATION DE LA SURFACE CULTIVEE

Faute d'éléments précis, cette superficie est déduite du débit caractéristique de crue sur 6 jours (QC6) atteint à Bakel, qui représente la valeur maximale annuelle de débit dépassée pendant 6 jours consécutifs à cette station. La relation est établie à partir des valeurs de superficie cultivée en décrue annoncées par Gibb (1987), en regard des hydrogrammes standards A, B, C. Le sommet de ces hydrogrammes étant constitué d'un palier de 6 jours à 2 500, 2 750 et 3 000 m<sup>3</sup>/s respectivement, pour des superficies cultivées respectives de 50 000, 75 000 et 100 000 ha, on retient donc la relation suivante :

$$\begin{aligned} \text{Superficie (10}^3 \text{ hectares)} &= (\text{QC6(m}^3\text{/s)} - 2\,000)/10 && \text{si QC6} > 2\,000 \\ &= 0 && \text{si QC6} < 2\,000 \end{aligned}$$

On note cependant que ces relations peuvent donner des valeurs très grandes dans le cas de forts débits caractéristiques de crues (régime naturel en 1958 : QC6 = 7 039 m<sup>3</sup>/s => superficie = 504 000 ha). Or les superficies cultivées ne dépassent jamais 150 000 ha. Nous proposons donc par la suite deux versions de résultats pour la superficie cultivée : la première (tableau 5) est issue de l'application brutale de la formule donnée ci-dessus. La seconde (tableaux 5 bis et 6 bis) découle de la limitation à 150 000 hectares des résultats de cette même formule.

## **6. RESULTATS OBTENUS**

Les tableaux 1 à 6 reprennent l'ensemble des résultats concernant la puissance électrique moyenne annuelle produite, le débit caractéristique de crue sur 6 jours et la superficie cultivée en décrue.

On remarque sur les tableaux 1 et 3 que les simulations effectuées sur la période 1970-1997 donnent quasiment les mêmes résultats que ceux qu'on obtient sur cette période dans les simulations initialisées en 1950. Ceci est dû au fait que ces derniers calculs donnent pour la cote du lac au 1<sup>er</sup> janvier 1970, des valeurs proches de la cote de débordement (208,05 m) retenue pour l'initialisation des calculs : 208,02 m ; 207,73 m et 207,73 m pour les scénarios A, B, C respectivement.

### **6.1 Puissance électrique produite**

Fort logiquement, c'est le scénario B qui donne les meilleures valeurs moyennes inter annuelles de puissance moyenne annuelle produite, suivi de C et A (voir tableau 1).

Sur la période 1950-1993, les différences sont très nettes. Entre 1970 et 1993 par contre, le scénario A donne des résultats assez proches du scénario C. Ceci est dû au fait que le scénario A entraîne des lâchés importants en période de hautes eaux, quand le lac est à un niveau élevé, et modérés en période de basses eaux, quand le niveau s'abaisse. Ce turbinage de l'eau effectué dans de bonnes conditions de chutes suffit, en période de faible hydraulité, à donner une puissance moyenne annuelle assez proche de celle obtenue avec le scénario C, qui intègre une consigne de production électrique tout au long de l'année.

Par contre, en période de forte hydraulité, le scénario A s'accompagne de forts déversements d'eau, perdus pour la production électrique. La comparaison des puissances moyennes annuelles produites pour les scénarios B et C montre des résultats équivalents environ 6 années sur 10 entre 1950 et 1993, ou 3 années sur 10 entre 1970 et 1993. Les pertes importantes de production électrique entraînées par le soutien de crue ne sont fréquentes qu'à partir de 1978.

La répartition mensuelle des puissances produites montre que le scénario B offre la plus grande régularité, suivi des scénarios C et A.

Les minimums de production s'observent dans tous les cas vers les mois de juin et juillet, avant la reconstitution du stock d'eau dans le lac au cours de la saison des pluies.

### **6.2 Débits du Sénégal à Bakel et surfaces cultivées en décrue**

Si l'on considère la moyenne inter annuelle des surfaces cultivées limitées à 150 000 hectares, on constate que le scénario A donne des résultats proches (1950-1993) voire supérieurs (1970-1993) à ceux du régime naturel (tableau 5 bis).

Les scénarios A et C donnent de meilleures surfaces cultivées que le régime naturel, environ 7 années sur 10 sur la période 1970-1993.

Le scénario B donne une surface nulle de 1976 à 1993 (tableau 5 bis). Par rapport au scénario B, le soutien de crue entraîne un affaiblissement des débits d'étiage dans le scénario C. Cet affaiblissement est encore plus marqué pour le scénario A, dans lequel n'intervient aucune consigne de préservation du stock d'eau dans le lac.

Le régime naturel quant à lui, montre des étiages très faibles, pouvant s'étendre sur 1 à 6 mois avec des débits inférieurs à 25 m<sup>3</sup>/s .

scénario	période 1950-1997			période 1970-1997		
	A	B	C	A	B	C
année						
1950	966	1057	1057			
1951	979	1039	1049			
1952	894	999	988			
1953	920	1023	1025			
1954	1024	1126	1126			
1955	971	1074	1074			
1956	898	1019	1019			
1957	957	1070	1072			
1958	986	1094	1097			
1959	903	1029	1029			
1960	864	978	976			
1961	935	1046	1046			
1962	893	1002	1004			
1963	878	957	996			
1964	886	999	1000			
1965	891	971	974			
1966	843	953	979			
1967	969	1079	1079			
1968	773	896	875			
1969	940	1015	1020			
1970	856	965	966	867	970	955
1971	811	915	928	811	915	928
1972	782	833	833	782	833	833
1973	756	852	901	756	852	901
1974	822	957	794	822	957	794
1975	845	915	959	845	915	959
1976	781	952	900	781	952	900
1977	741	788	858	741	788	858
1978	520	738	457	520	738	457
1979	444	788	538	444	788	538
1980	709	600	617	709	600	617
1981	587	717	456	587	717	456
1982	412	714	385	412	714	385
1983	346	614	439	346	614	439
1984	529	673	622	529	673	622
1985	647	456	424	647	456	424
1986	444	564	434	444	564	434
1987	301	658	408	301	658	408
1988	675	697	686	675	697	686
1989	699	745	689	699	745	689
1990	483	713	501	483	713	501
1991	744	714	740	744	714	740
1992	749	788	563	749	788	563
1993	493	788	356	493	788	356
1994	316	675	435	316	675	435
1995	807	915	806	807	915	806
1996	740	873	895	740	873	895
1997	796	899	704	796	899	704
moyenne	754	874	808	637	768	653

Tableau 1: énergie moyenne annuelle produite (GWh)

scénario	période 1950 - 1997			période 1970 - 1997		
	A	B	C	A	B	C
temps de retour (année)						
10	444,36	662,28	434,17	366,10	603,85	412,88
5	534,50	714,15	504,36	448,28	673,57	435,80
3	740,96	788,49	696,51	527,26	713,87	493,33
2	801,63	915,16	897,59	704,04	766,94	653,93
3	881,83	974,90	983,27	750,54	836,35	796,37
5	918,21	1022,91	1024,15	794,38	913,58	891,08
10	968,02	1066,05	1067,64	818,41	940,78	919,76

Tableau 2: répartition de l'énergie moyenne annuelle produite (GWh)

Tableau n°3

scénario	période 1950 - 1997				période 1970 - 1997			
	naturel	A	B	C	naturel	A	B	C
année								
1950	6798	4515	4513	4513				
1951	5157	4055	4055	3813				
1952	4972	4406	4406	4018				
1953	3982	3234	3143	2945				
1954	6448	4525	4525	4525				
1955	4913	4500	4490	4490				
1956	5995	3926	3872	3872				
1957	5703	4347	4244	4194				
1958	7039	4525	4504	4504				
1959	5442	3794	3794	3794				
1960	2944	2511	2657	2499				
1961	6738	4524	4524	4524				
1962	4343	3939	3229	3229				
1963	3494	2451	2224	2452				
1964	6554	4553	4553	4553				
1965	6566	4425	3737	3732				
1966	5466	4332	4332	3951				
1967	5871	4500	4500	4500				
1968	2797	2455	1763	2455				
1969	3829	3861	3856	2546				
1970	3232	3004	2613	2485	3232	3004	2613	2548
1971	4295	4484	2909	2902	4295	4484	2909	2902
1972	1454	937	743	743	1454	937	743	743
1973	2614	2454	1403	2454	2614	2454	1403	2454
1974	6005	4325	3394	3140	6005	4325	3394	3140
1975	4211	2515	2429	2456	4211	2515	2429	2456
1976	1926	2474	1324	2474	1926	2474	1324	2474
1977	1907	2425	1061	2425	1907	2425	1061	2425
1978	2405	2483	1501	1899	2405	2483	1501	1899
1979	1646	474	659	671	1646	474	659	671
1980	2780	2453	1199	2453	2780	2453	1199	2453
1981	2193	2404	1095	2404	2193	2404	1095	2404
1982	1994	2014	1183	1782	1994	2014	1183	1782
1983	1046	249	416	423	1046	249	416	423
1984	838	378	577	580	838	378	577	580
1985	1968	2424	886	2424	1968	2424	886	2424
1986	2295	2450	988	2087	2295	2450	988	2087
1987	1381	354	527	500	1381	354	527	500
1988	3028	2386	1927	2386	3028	2386	1927	2386
1989	2534	2474	1672	2474	2534	2474	1672	2474
1990	1536	532	692	638	1536	532	692	638
1991	2504	2391	1172	2391	2504	2391	1172	2391
1992	1976	2449	783	2449	1976	2449	783	2449
1993	1855	2463	828	1909	1855	2463	828	1909
1994	2834	2065	1633	1995	2834	2065	1633	1995
1995	3138	2489	1673	2489	3138	2489	1673	2489
1996	2215	2438	1252	2438	2215	2438	1252	2438
1997	2453	2488	1326	2488	2453	2488	1326	2488
moyenne	3610,7	2913,6	2391,4	2730,6	2438	2159,9	1352,3	2000,8

Tableau 3: débit caractéristique de crue sur 6 jours (m<sup>3</sup>/s)

scénario	période 1950 - 1997				période 1970 - 1997			
	naturel	A	B	C	naturel	A	B	C
temps de retour (année)								
10	1569	654	707	693	1403	407	602	597
5	1969	2392	995	2004	1667	1045	747	847
3	2429	2450	1288	2431	1961	2390	971	1981
2	2986	2486	1845	2474	2255	2444	1191	2414
3	4319	3893	3311	3042	2547	2465	1419	2453
5	5679	4400	4225	3943	3009	2488	1673	2474
10	6522	4511	4503	4503	3917	2857	2558	2530

Tableau 4: répartition du débit caractéristique de crue sur 6 jours (m<sup>3</sup>/s)

Tableau n°4



scénario	période 1950 - 1997				période 1970 - 1997			
	naturel	A	B	C	naturel	A	B	C
année								
1950	480	252	251	251				
1951	316	206	206	181				
1952	297	241	241	202				
1953	198	123	114	95				
1954	445	253	253	253				
1955	291	250	249	249				
1956	400	193	187	187				
1957	370	235	224	219				
1958	504	253	250	250				
1959	344	179	179	179				
1960	94	51	66	50				
1961	474	252	252	252				
1962	234	194	123	123				
1963	149	45	22	45				
1964	455	255	255	255				
1965	457	243	174	173				
1966	347	233	233	195				
1967	387	250	250	250				
1968	80	46	0	46				
1969	183	186	186	55				
1970	123	100	61	49	123	100	61	55
1971	230	248	91	90	230	248	91	90
1972	0	0	0	0	0	0	0	0
1973	61	45	0	45	61	45	0	45
1974	401	233	139	114	401	233	139	114
1975	221	52	43	46	221	52	43	46
1976	0	47	0	47	0	47	0	47
1977	0	43	0	43	0	43	0	43
1978	41	48	0	0	41	48	0	0
1979	0	0	0	0	0	0	0	0
1980	78	45	0	45	78	45	0	45
1981	19	40	0	40	19	40	0	40
1982	0	1	0	0	0	1	0	0
1983	0	0	0	0	0	0	0	0
1984	0	0	0	0	0	0	0	0
1985	0	42	0	42	0	42	0	42
1986	30	45	0	9	30	45	0	9
1987	0	0	0	0	0	0	0	0
1988	103	39	0	39	103	39	0	39
1989	53	47	0	47	53	47	0	47
1990	0	0	0	0	0	0	0	0
1991	50	39	0	39	50	39	0	39
1992	0	45	0	45	0	45	0	45
1993	0	46	0	0	0	46	0	0
1994	83	7	0	0	83	7	0	0
1995	114	49	0	49	114	49	0	49
1996	22	44	0	44	22	44	0	44
1997	45	49	0	49	45	49	0	49
moyenne	170	110	84	92	60	48	12	32

Tableau 5: évolution de la surface cultivée en décrue (1000 ha)  
(surface non limitée)

scénario	période 1950 - 1997				période 1970 - 1997			
	naturel	A	B	C	naturel	A	B	C
temps de retour (année)								
10	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	39	0	1	0	0	0	0
3	43	45	0	43	0	39	0	0
2	99	49	0	47	26	44	0	41
3	232	189	131	104	55	46	0	45
5	368	240	223	194	101	49	0	47
10	452	251	250	250	192	86	56	53

Tableau 6: répartition de la surface cultivée en décrue (1000 ha)  
(surface non limitée)

Tableau n°5

scénario	période 1950 - 1997				période 1970 - 1997			
	naturel	A	B	C	naturel	A	B	C
année								
1950	150	150	150	150				
1951	150	150	150	150				
1952	150	150	150	150				
1953	150	123	114	95				
1954	150	150	150	150				
1955	150	150	150	150				
1956	150	150	150	150				
1957	150	150	150	150				
1958	150	150	150	150				
1959	150	150	150	150				
1960	94	51	66	50				
1961	150	150	150	150				
1962	150	150	123	123				
1963	149	45	22	45				
1964	150	150	150	150				
1965	150	150	150	150				
1966	150	150	150	150				
1967	150	150	150	150				
1968	80	46	0	46				
1969	150	150	150	55				
1970	123	100	61	49	123	100	61	55
1971	150	150	91	90	150	150	91	90
1972	0	0	0	0	0	0	0	0
1973	61	45	0	45	61	45	0	45
1974	150	150	139	114	150	150	139	114
1975	150	52	43	46	150	52	43	46
1976	0	47	0	47	0	47	0	47
1977	0	43	0	43	0	43	0	43
1978	41	48	0	0	41	48	0	0
1979	0	0	0	0	0	0	0	0
1980	78	45	0	45	78	45	0	45
1981	19	40	0	40	19	40	0	40
1982	0	1	0	0	0	1	0	0
1983	0	0	0	0	0	0	0	0
1984	0	0	0	0	0	0	0	0
1985	0	42	0	42	0	42	0	42
1986	30	45	0	9	30	45	0	9
1987	0	0	0	0	0	0	0	0
1988	103	39	0	39	103	39	0	39
1989	53	47	0	47	53	47	0	47
1990	0	0	0	0	0	0	0	0
1991	50	39	0	39	50	39	0	39
1992	0	45	0	45	0	45	0	45
1993	0	46	0	0	0	46	0	0
1994	83	7	0	0	83	7	0	0
1995	114	49	0	49	114	49	0	49
1996	22	44	0	44	22	44	0	44
1997	45	49	0	49	45	49	0	49
moyenne	86	80	61	71	45	42	12	32

Tableau 5 bis : évolution de la surface cultivée en décrue (1000 ha)  
(surface limitée à 150000 ha)

scénario	période 1950 - 1997				période 1970 - 1997			
	naturel	A	B	C	naturel	A	B	C
temps de retour (année)								
10	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	39	0	1	0	0	0	0
3	43	45	0	43	0	39	0	0
2	99	49	0	47	26	44	0	41
3	150	150	131	104	55	46	0	45
5	150	150	150	150	101	49	0	47
10	150	150	150	150	142	86	56	53

Tableau 6 bis : répartition de la surface cultivée en décrue (1000 ha)  
(surface limitée à 150000 ha)

## Tableau n°6

### LEGENDE des figures n° 5 et 6 : CONSIGNES DE GESTION A – B et C

- 1) Respect d'un débit réservé de 50m<sup>3</sup>/s à la sortie du barrage du barrage. [Qmina]
- 2) Lâché d'eau pour garantir un débit minimal réservé à Bakel, destiné à l'irrigation. Celui-ci vaut 200 m<sup>3</sup>/s si le niveau du lac est supérieur ou égal à 195 m IGN, et 100 m<sup>3</sup>/s sinon. [Qminb]
- 3) Préservation du niveau du lac. Quand le niveau du lac est inférieur ou égal à 195 m IGN, les lâchés sont limités à la borne supérieure de la fourchette déterminée à partir des règles de priorité supérieure. [Qmaxa]
- 4) Laminage des crues du Sénégal à Bakel à 4 500 m<sup>3</sup>/s en débit journalier. [Qmaxa]
- 5) Préservation d'une revanche de sécurité dans le lac, garantissant un niveau d'échec de 1 année sur 50 pour le laminage envisagé. [Qminb]
- 6) Production d'électricité : on lâche un débit permettant de produire soit 90 MW si la cote du lac est supérieure à 182 m IGN, soit la maximum productible si la cote dépasse le seuil de déversement du barrage. La puissance installée envisagée atteint cinq fois 40 MW. [Qmina]
- 7) Soutien de crue à date variable [Qmina], envisageant une prévision à 10 jours des débits passant à Oualia et Goubassy. L'hydrogramme de crue retenu, de volume quasi identique au « GIBB A », est noté « ORSTOM1 ». Il est défini comme suit au niveau de Bakel (m<sup>3</sup>/s) :

0 le jour 0 - 2 500 le jour 6 - 2 500 le jour 11 - 0 le jour 55

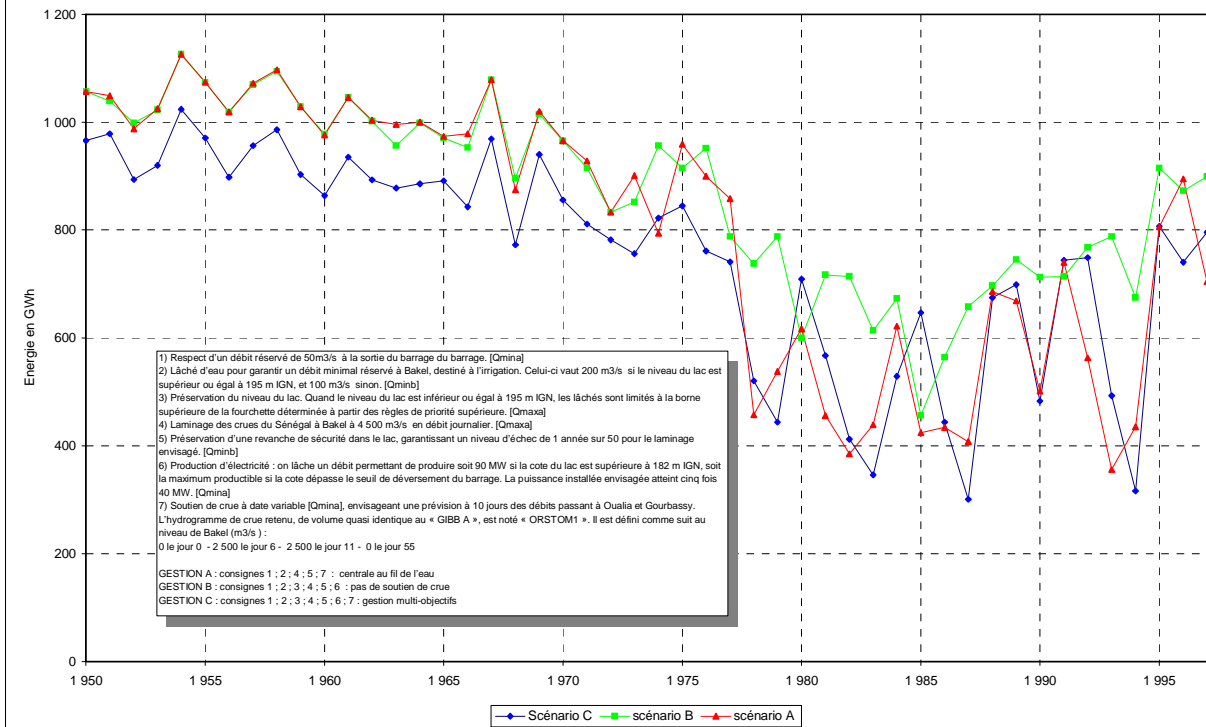
GESTION A : consignes 1 ; 2 ; 4 ; 5 ; 7 : centrale au fil de l'eau

GESTION B : consignes 1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 : pas de soutien de crue

GESTION C : consignes 1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7 : gestion multi-objectifs

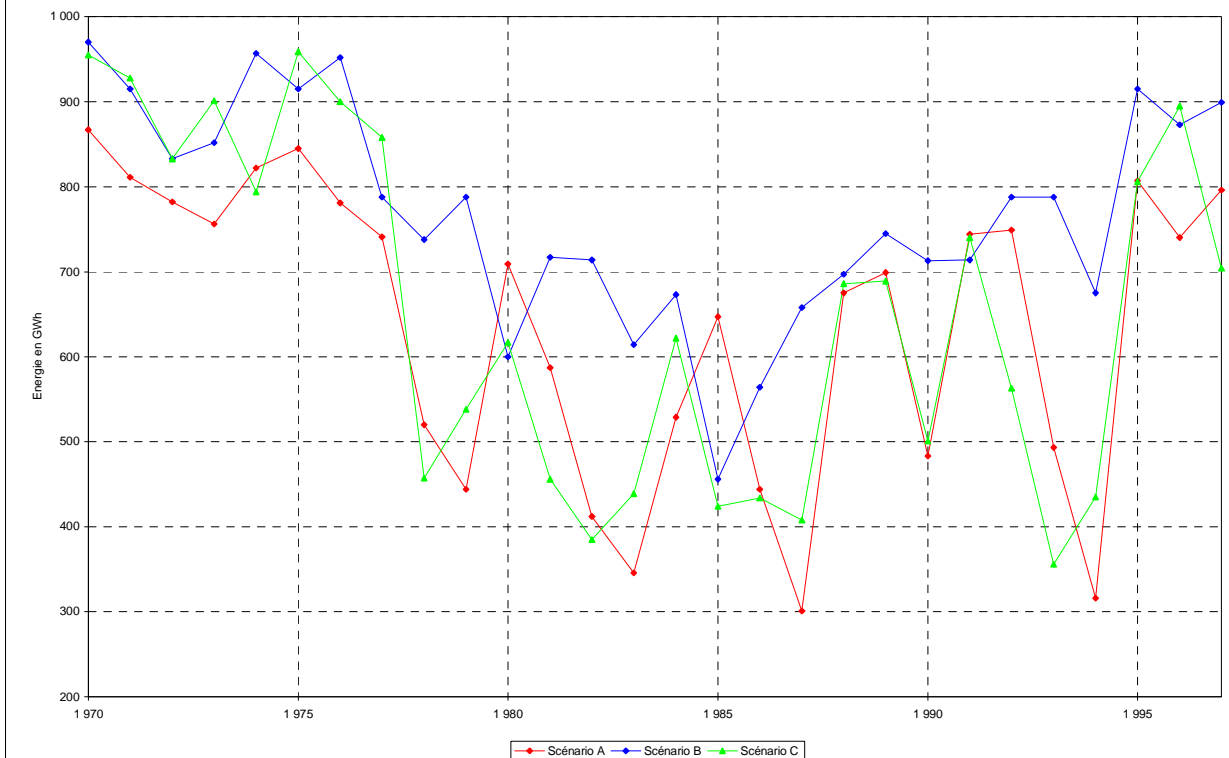
Energie annuelle moyenne produite  
Période 1950 - 1997

Figure n°5



Energie annuelle moyenne produite  
Période 1970 - 1997

Figure n°6



## TROISIEME PARTIE

### Application du modèle de propagation en régime artificiel

#### Objet de cette note

Si elle est menée de la même façon que pour le régime naturel, l'application du modèle en régime artificiel conduit à une mauvaise estimation des apports intermédiaires entre stations amont et aval. Il s'agit ici d'évaluer l'importance de l'erreur systématique commise, et d'explicitier le mode d'application correcte du modèle en régime artificiel.

#### Problème posé par l'application du modèle de propagation en régime artificiel

Le modèle de propagation de débits entre Manantali, Oualia et Kayes fait correspondre à une somme de débits simultanés à Oualia et Manantali à l'instant  $t$ , notée  $Q_{\text{amont}}(t)$ , un débit à Kayes à l'instant  $t + d$  noté  $Q_{\text{aval}}(t+d)$ .

L'analyse des données du régime naturel permet d'établir deux relations donnant  $Q_{\text{aval}}$  et  $d$  en fonction de  $Q_{\text{amont}}$  :

$$Q_{\text{aval}} = f(Q_{\text{amont}})$$

$$d = g(Q_{\text{amont}})$$

Le modèle suppose donc que les apports intermédiaires entre Manantali, Oualia et Kayes, notés  $Q_{\text{inter}}$ , sont eux aussi fonction de la somme des débits à Oualia et Manantali :

$$Q_{\text{inter}} = Q_{\text{aval}} - Q_{\text{amont}} = f(Q_{\text{amont}}) - Q_{\text{amont}} = h(Q_{\text{amont}})$$

$$Q_{\text{inter}} = Q_{\text{aval}} - f^{-1}(Q_{\text{aval}}) = k(Q_{\text{aval}})$$

Deux facteurs contribuent à la bonne adéquation du modèle pour représenter le régime naturel :

- Les apports intermédiaires  $Q_{\text{inter}}$  représentent une part assez faible de la somme  $Q_{\text{amont}}$  des apports à Oualia et Manantali (moins de 5% en volume sur la période 1970-1998)
- Le régime de mousson caractérisant la saison des pluies sur le haut bassin du Sénégal, permet de penser que les apports intermédiaires sont naturellement corrélés avec les apports naturels de l'amont.

Notons  $Q_{\text{amont}}^{\text{naturel}}$  et  $Q_{\text{amont}}^{\text{artificiel}}$  la somme des débits passant à Oualia et Manantali, respectivement en régime naturel et en régime artificiel. L'application sans précaution du modèle consiste à écrire :

$$Q_{\text{aval}}^{\text{artificiel}} = f(Q_{\text{amont}}^{\text{artificiel}})$$

$$d = g(Q_{\text{amont}}^{\text{artificiel}})$$

Cet algorithme de calcul sera désormais appelé "méthode 1".

Avec cette méthode de calcul en régime artificiel, on s'expose à un risque d'erreur dès lors que les lâchers du barrage diffèrent de façon importante de ce qu'auraient été les débits naturels au droit du barrage. En effet, le calcul suppose alors implicitement que les apports intermédiaires sont liés au débit lâché du barrage, ce qui n'a aucune raison d'être. Le débit à Kayes risque donc d'être surévalué quand on lâche plus que le débit naturel (ceci se produit plutôt en saison sèche), ou sous-évalué dans le cas inverse qui se produit plutôt en période de crue. Nous allons estimer ci-dessous l'ordre de grandeur de l'erreur ainsi commise.

#### Période de basses eaux

Pour des valeurs de  $Q_{\text{amont}}$  inférieures à  $196 \text{ m}^3/\text{s}$ , les apports intermédiaires évalués en régime naturel restent compris entre  $+2$  et  $-13 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ils restent négatifs, compris entre  $-2$  et  $-32 \text{ m}^3/\text{s}$ , pour  $Q_{\text{amont}}$  compris entre  $196$  et  $706 \text{ m}^3/\text{s}$ . Le soutien d'étiage est assuré par des lâchers inférieurs à  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ , sur une période durant laquelle le débit naturel à Manantali peut s'annuler. D'après les chiffres indiqués plus haut, on voit que l'application sans précaution du modèle de propagation pendant le soutien d'étiage peut entraîner une erreur systématique allant jusqu'à  $11 \text{ m}^3/\text{s}$ . Une surestimation très importante du débit calculé à l'aval ne risque d'être observée qu'en cas de très forts lâchers ( $> 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ) pendant l'étiage.

## Période de hautes eaux

Pour les valeurs de  $Q_{\text{amont}}$  supérieures à  $706 \text{ m}^3/\text{s}$ , les débits  $Q_{\text{inter}}$  sont strictement croissants en fonction de  $Q_{\text{amont}}$ , atteignant  $+455 \text{ m}^3/\text{s}$  pour  $Q_{\text{amont}}=3500 \text{ m}^3/\text{s}$ . Pour des débits naturels  $Q_{\text{amont}}$  importants ( $>1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ) et largement supérieurs aux lâchers effectués, on voit donc que l'application du modèle sans précaution peut conduire à sous-estimer le débit  $Q_{\text{aval}}$  à Kayes de quelques centaines de mètres cube par seconde.

## Méthode préconisée pour l'application du modèle en régime artificiel

Les apports intermédiaires  $Q_{\text{inter}}$ , identiques a priori en régime naturel et artificiel, sont logiquement reliés à  $Q_{\text{amont, naturel}}$  par la relation déduite du modèle de propagation :

$$Q_{\text{inter}} = h (Q_{\text{amont, naturel}})$$

Le débit aval artificiel peut quant à lui être estimé par :

$$Q_{\text{aval, artificiel}} = Q_{\text{amont, artificiel}} + Q_{\text{inter}} = Q_{\text{amont, artificiel}} + h (Q_{\text{amont, naturel}})$$

Le temps de propagation n'est a priori relié ni au débit amont artificiel, ni au débit amont naturel, mais plutôt au débit aval artificiel. En utilisant la relation déduite du modèle de propagation on obtient :

$$d = k (Q_{\text{aval, artificiel}})$$

Cet algorithme de calcul sera désormais appelé "méthode 2".

## Application du modèle de propagation pendant la crue de 1997

Afin d'estimer l'importance de l'erreur commise en 1997 par l'application du modèle de propagation par la méthode 1, les deux méthodes présentées ont été appliquées pour estimer les débits passés à Kayes, à partir des débits observés à Oualia et des lâchés évalués par le gestionnaire du barrage. Le calcul concerne la période du 1/6 au 31/11.

Comme on le voit sur la figure 7, le débit lâché du barrage a été la plupart du temps inférieur au débit naturel (évalué par modèle de propagation à partir des débits observés à Makana) sur la période envisagée. On peut donc s'attendre à ce que les débits de Kayes calculés par la méthode 1 soient sous-estimés.

La figure 8 montre comme prévu que la méthode 2 donne de meilleurs résultats que la méthode 1.

La différence de volume écoulé calculé pendant 6 mois s'élève à 221 millions de mètres cube entre les deux méthodes, ce qui représente un débit moyen de  $14 \text{ m}^3/\text{s}$ . Un excédent d'eau très important (1417 millions de  $\text{m}^3$ , soit un débit moyen de  $90 \text{ m}^3/\text{s}$  pendant 6 mois) subsiste malgré tout entre les débits observés à Kayes et ceux qui sont reconstitués par la méthode 2.

Puisque les débits reconstitués de façon correcte par modèle de propagation sous-estiment de façon importante les débits observés à Kayes, il est certain qu'au moins un des trois termes suivants est erroné :

- Somme des débits de Oualia et des lâchés de Manantali (qui serait sous-estimée)
- Débit observé à Kayes, (qui serait surestimé)
- Apports intermédiaires évalués par modèle de propagation (qui seraient sous-estimés)

Sans écarter les autres hypothèses, deux raisons nous amènent à soupçonner en priorité une sous-estimation des lâchés effectués à Manantali :

Sur la période du 1/6/97 au 30/11/97, la différence entre volume final et volume initial dans la retenue (calculés par courbes de remplissage) s'élève à  $+3171 \text{ Mm}^3$ . Or sur la même période, le bilan de volume calculé à partir des entrées (calculées par propagation des débits de Makana jusqu'à Manantali), des sorties et des pertes estimées par évaporation s'élève à  $+4162 \text{ Mm}^3$ . La différence entre ces deux valeurs pourrait s'expliquer par une sous-estimation de 991 millions de mètres cube au niveau des sorties du barrage.

La différence de volume écoulé sur la période du 1/6 au 30/11, entre Kayes d'une part, et Oualia et Manantali d'autre part, s'élève en 1997 à  $1735 \text{ Mm}^3$ . Comparée à la série historique de ces différences de volume sur la période 1950-1997 pour le régime naturel (reconstitué à partir de 1987), la valeur  $1735.10^9$  est très peu probable, puisqu'elle correspond à une fréquence de non dépassement de 0,97.

Elle dépasse de loin la plus forte valeur obtenue sur la période 1970-1997, qui s'élevait à  $1094.10^9$  en 1974. Il apparaît donc peu probable que des apports intermédiaires très importants en 1997, tout à fait possibles, puissent à eux seuls expliquer l'excédent d'eau constaté à Kayes.

## Conclusion

Pour le calcul des débits à la station de Kayes à partir des lâchers effectués à Manantali, il apparaît indispensable d'appliquer le modèle de propagation suivant la deuxième méthode présentée dans cette note. La première méthode appliquée jusqu'alors est entachée d'un risque d'erreur systématique. En toute logique, cette conclusion s'applique aussi pour le calcul de propagation entre Kayes, Gourbassy et Bakel.

L'application incorrecte du modèle de propagation à l'aval de Manantali pendant la crue de 1997 a entraîné une erreur systématique assez faible (sous-estimation de 3,5%), ne représentant que 13% de l'excès d'eau constaté entre volumes observé et attendu à Kayes, et 2,8% du volume observé à cette station.

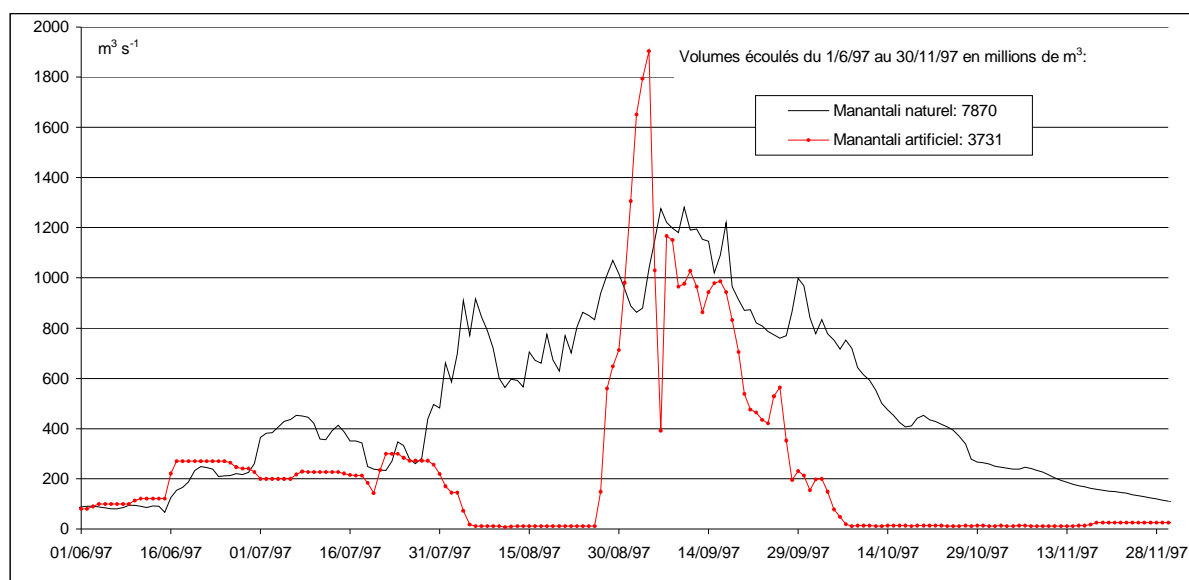


Figure 7 : débits du Bafing à Manantali, régime artificiel observé et régime naturel reconstitué.

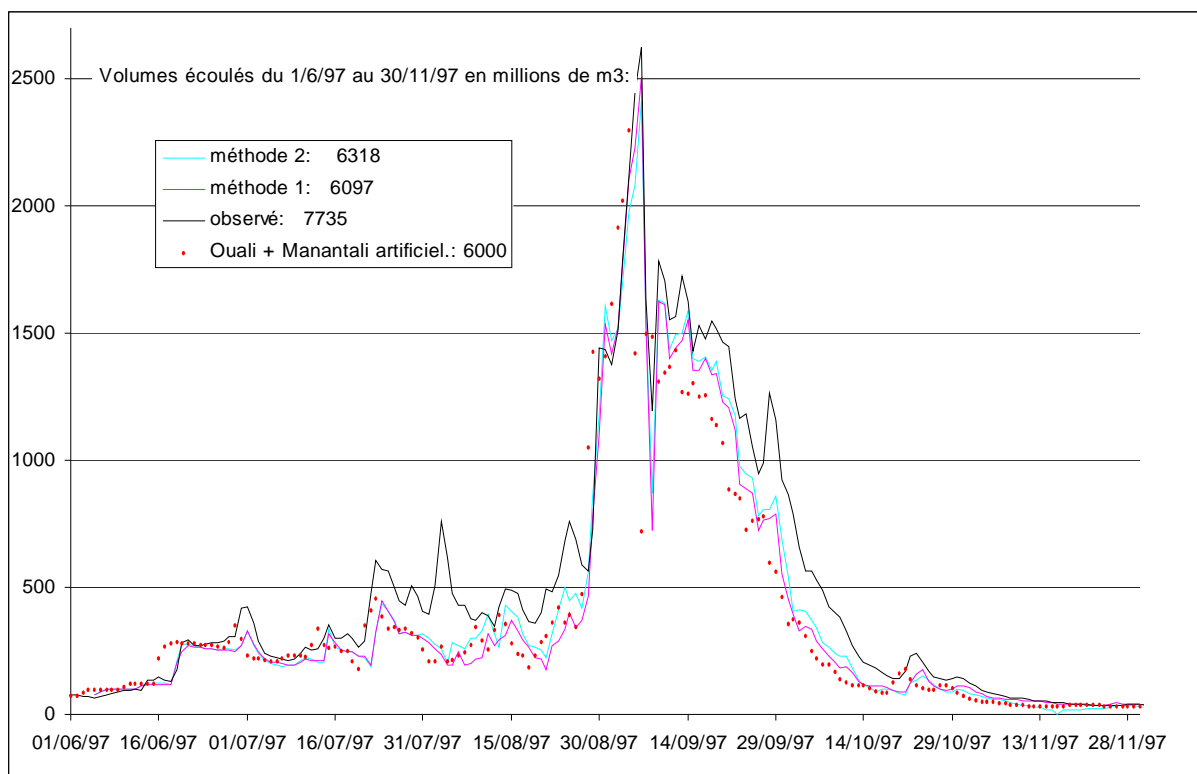


Figure 8 : Comparaison des débits observés à Kayes en 1997 :

- avec les débits calculés par modèle de propagation (méthodes 1 et 2)
- avec la somme des débits à Oualia et Manantali.