



ORGANISATION POUR LA MISE EN VALEUR DU FLEUVE SENEGAL

(O . M . V . S .)

Organisation pour la Mise en Valeur
du Fleuve Sénégal (OMVS)
Haut Commissariat
Centre Régional de Documentation
Saint-Louis

09472

PROGRAMME D'OPTIMISATION DE LA GESTION DES RESERVOIRS

PHASE II

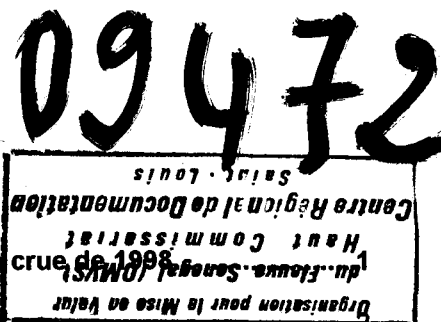
TOME 2

GESTION DU RESERVOIR DE MANANTALI
EBAUCHE DU MANUEL DE GESTION



Institut de recherche
pour le développement

TABLE DES MATIERES



Rappel des travaux menés préalablement, ou en parallèle, à la gestion de la crue de 1998	2
Définition de l'hydrogramme objectif de crue	2
Manuel de gestion du barrage de Manantali	2
Soutien de crue mobile ou à date fixe. Incidence sur le productible énergétique.	2
Coordination entre l'ORSTOM et le gestionnaire du barrage	2
volumes écoulés sur le haut bassin du Sénégal entre le 20 août et le 20 octobre, pour les années 1997 et 1998	3
débits caractéristiques de la crue de 1998, sur 1, 5 et 10 jours consécutifs	3
Gestion réalisée, et débits observés sur le haut bassin du Sénégal	4
Bilan de volume écoulé à l'aval de Bakel pendant la crue de 1998	12

ANNEXE 1

Note sur la programmation du soutien de crue de 1998 + Addendum

Programmation du soutien de crue de 1998	17
Résumé	17
Objet de cette note	17
Rappel des objectifs de gestion actuellement retenus	17
Evaluation du stockage net annuel dans la retenue	18
Capacité de retenue nécessaire	19
Analyse statistique du stockage net annuel dans la retenue	19
Analyse statistique du stockage bisannuel dans la retenue.	20
Cote du lac au 20 août conditionnant le déclenchement du soutien de crue. Influence sur le productible énergétique	21

ADDENDUM

Choix de l'hydrogramme de crue	29
Résultats numériques communiqués oralement par l'ORSTOM lors de la réunion du 18/8/98	30

ANNEXE 2

Ebauche d'un manuel de gestion du barrage de Manantali	32
Objet de cette note	32
Principe de la gestion proposée pour le barrage de Manantali	33
Limites Qmin et Qmax de débit total à lâcher, liées aux contraintes de gestion	33
Contraintes liées aux caractéristiques de l'ouvrage	33
Contraintes liées aux caractéristiques de la retenue	33
Limites Qmin et Qmax de débit total à lâcher, liées aux consignes de gestion	34
Consignes visant à satisfaire une demande d'eau exprimée à l'aval de l'ouvrage	34
1 - Lâcher de l'eau pour satisfaire la demande dans l'immédiat.	34
2 - Conservation d'un stock d'eau suffisant dans la retenue pour satisfaire la demande dans le futur	34
Consignes relatives au laminage des crues	35
1 - Ne pas lâcher trop d'eau afin d'assurer le laminage des débits dans l'immédiat.	35
2 - Conservation d'une revanche suffisante dans la retenue, afin de garantir la possibilité de laminier les crues dans le futur	35
Consignes concernant une demande de production électrique	36
1- Détermination de Qmin	36
2- Détermination de Qmax	37
3- Cas particulier de l'étiage	37
Calcul du débit total à lâcher par combinaison des limites Qmin et Qmax	37
1- Pour une limite minimale Qmin :	37
2- Pour une limite maximale Qmax :	38
Calcul du débit à faire passer dans les différents organes du barrage.	38
Simulations de gestion	38

ANNEXE 3

Note sur l'éventuelle impossibilité de faire une prévision de débit à 10 jours sur le Bakoye et la Falémé. Conséquences prévisibles sur le productible énergétique du barrage de Manantali.

Résumé.....	41
Conclusion	42
1. Stade actuel des études concernant la prévision de débit sur le Bakoye et la Falémé.....	43
2. Soutien de crue systématique à date fixe ou soutien à date mobile. Différences sur le productible énergétique (& 2.1.1 du rapport de synthèse de première phase).....	43
3. Le soutien de crue à date fixe optimale. Coût en eau	44
4. Soutien de crue à date fixe optimale, réalisé de façon non systématique en fonction du stock disponible dans le lac.....	45
4.1 Principe	45
4.2 Simulations numériques.....	45
4.3 Résultats obtenus	46

ANNEXE 4

Procédure recommandée pour le calcul des lâchers du barrage de Manantali, lors de la crue 1998- 1999

1. Principe général.....	49
2. Modifications apportées à la nouvelle version du logiciel	49
3. Modifications concernant les consignes d'utilisation du logiciel.....	50
3.1. Fréquence de réglage des vannes	50
3.2. Procédures de correction manuelle des lâchers calculés par PROGEMAN.....	50
4. Valeurs de débit lâché à saisir avec PROGEMAN.....	52

ANNEXE 5

Evaluation des débits écoulés à l'aval de Bakel en 1998

GESTION DU BARRAGE DE MANANTALI PENDANT LA CRUE DE 1998

Rappel des travaux menés préalablement, ou en parallèle, à la gestion de la crue de 1998

Définition de l'hydrogramme objectif de crue

Dans le but de faciliter la compréhension et l'analyse des processus d'inondation du lit majeur dans la vallée, un hydrogramme objectif ("ORSTOM2" ou "ORSTOM3"), supérieur à celui de 1997 ("ORSTOM1") était envisagé pour 1998. Les conséquences probables d'une telle option sur le remplissage de la retenue de Manantali à l'horizon 2000 ont été analysées dans une note suivie d'un addendum, figurant en **annexe 1**. Cette analyse, présentée par l'ORSTOM les 18 et 19 août 1998 aux membres de la Commission Permanente de Eaux tenue à Bamako, aboutit à la conclusion suivante :

Compte tenu du volume stocké dans la retenue au 20/8/98, la réalisation d'un soutien de crue de type "ORSTOM3" en 1998, suivie de deux années sans soutien de crue en 1999 et 2000, permet d'envisager le remplissage de la retenue au 31/12/2000 avec une probabilité supérieure à 83 chances sur 100.

La CPE a finalement retenu l'hydrogramme "ORSTOM3" (**tableau 1**) comme objectif de gestion à réaliser pendant la crue de 1998.

date	22-août	30-août	04-sept	17-oct
débit	0	3000	3000	0

Tableau 1 : hydrogramme "ORSTOM3"

Manuel de gestion du barrage de Manantali

Les principes de gestion proposés par l'ORSTOM pour le barrage de Manantali, ont été résumés dans une note de quelques pages (**annexe 2**), présentée rapidement aux membres de la CPE réunis en août 1998 à Bamako. Les remarques formulées par la CPE au sujet de cette ébauche seront prises en compte pour la rédaction de la version préliminaire du manuel de gestion.

Soutien de crue mobile ou à date fixe. Incidence sur le productible énergétique.

Dans un contexte d'années déficitaires en eau comme celui qui prévaut depuis le début des années 70, le soutien de crue et la production d'électricité apparaissent clairement comme deux objectifs concurrents. Quelque soit la gestion adoptée, l'augmentation de la fréquence des crues correctement soutenues se fait au prix d'une diminution de la production électrique.

Le soutien de crue à date mobile est un compromis de gestion qui ne pénalise trop, ni la production d'électricité, ni les cultures de décrue. Il permet en effet, moyennant une prévision de débit à l'horizon 10 jours, d'abandonner le soutien de crue et de reconstituer ainsi le stock dans le lac, pendant les années où le soutien coûterait le plus d'eau au barrage. On obtient alors (statistiques sur la période 1970-1993) une puissance moyenne produite de 46,1 MW, avec, plus de 8 années sur 10, une crue supérieure à l'hydrogramme "ORSTOM1", alors que celui-ci n'est dépassé que plus de 6 années sur 10 en régime naturel.

La perte de production électrique engendrée par un soutien de crue à date fixe, par rapport au soutien mobile, a été estimée dans une note présentée en ~~annexe 3~~. Les principales conclusions de cette analyse faite sur la période 1970-1993 sont les suivantes, pour un hydrogramme objectif "ORSTOM1" dont le premier jour de palier à 2500 m³/s est fixé au 28 août :

- Le soutien de crue à date fixe réalisé chaque année systématiquement, aboutit à une production moyenne de 29,7 MW, ce qui représente une diminution 36% par rapport à celle qu'on obtient avec le soutien mobile.
- Si l'on ne réalise le soutien de crue à date fixe que les années où l'on dispose d'une cote supérieure à 182 m dans le lac au 20 août, alors la puissance moyenne obtenue vaut 44,7 MW et l'hydrogramme "ORSTOM1" est atteint ou dépassé plus de 8 années sur 10. Ce résultat est assez proche de celui qu'on obtient avec le soutien mobile.
- Si l'on ne réalise le soutien de crue à date fixe que les années où l'on dispose d'une cote supérieure à 190 m dans le lac au 20 août, alors la puissance moyenne obtenue vaut 58,7 MW et l'hydrogramme "ORSTOM1" est atteint ou dépassé plus de 6 années sur 10, comme en régime naturel.
- Le soutien de crue à date fixe paraît donc tout à fait envisageable sans perte de production électrique importante par rapport au soutien mobile, à condition de ne le réaliser que les années où la cote dans le lac dépasse, au début du soutien, un seuil de soutien S_{sout} suffisamment élevé.

Coordination entre l'ORSTOM et le gestionnaire du barrage.

Une rencontre a eu lieu les 20 et 21 août entre l'ORSTOM et le gestionnaire du barrage, afin de préparer la gestion de la crue de 1998 conformément aux objectifs retenus par la CPE. A cette occasion, il a été remis au gestionnaire une nouvelle version du logiciel PROGEMAN accompagné d'une courte note (~~annexe 4~~). Ce logiciel sert à calculer au jour le jour les lâchers nécessaires à Manantali pour atteindre l'hydrogramme objectif fixé à Bakel. Un téléphone satellite a également été remis par l'ORSTOM au gestionnaire lors de cette rencontre. Cet appareil a permis d'établir un contact journalier entre l'ORSTOM et Manantali pendant toute la crue, et d'opérer ainsi quelques adaptations sur le calcul de correction des débits lâchés en boucle fermée. Cette procédure, détaillée en ~~annexe 4~~, permet de recalculer en permanence les lâchés évalués avec PROGEMAN par modèle de propagation, en fonction des écarts constatés entre débits prévus et obtenus à l'aval. Après la brutale et imprévisible montée des eaux observée à Bakel et Kayes le 8/9/98 au matin, il a été décidé d'utiliser pour faire la correction, non plus les débits moyens journaliers du jour j-1 à Kayes et du jour j-3 à Manantali, mais le débit instantané du jour j au matin à Kayes et le débit moyen journalier du jour j-2 à Manantali. Ceci permet, au pris d'une légère baisse de précision, de raccourcir le temps de réaction d'une journée pour réajuster le réglage des vannes face à des événements aussi brutaux que celui qui a été observé à partir du 8 Septembre. Malheureusement, la nouvelle procédure n'a pu être appliquée qu'à partir du 9 Septembre au matin, suite à un problème de communication survenu dans la journée du 8.

		apports contrôlés aux stations										apports intermédiaires non contrôlés	
		Bafing	Bafing	Bafing		Bakoye	Sénégal		Falémé	Sénégal		entre Manantali, oualia et Kayes	entre Kayes, Gourbassy et Bakel
		Daka Saidou	Makana	Manantali		Oualia	Kayes		Gourbassy	Bakel			
		naturel	naturel	naturel	observé	naturel	naturel	artificiel	naturel	naturel	artificiel	naturel	naturel
année 1997	volume écoulé du 20/8 au 20/10	3639	3993	4560	2519	1577	7397	5308	1752	10233	8123	1169	1016
	fréquence de dépassement (période 1950-1998)	0.56	0.56	0.56	0.85	0.58	0.58	0.72	0.56	0.58	0.62	0.46	0.42
	fréquence de dépassement (période 1970-1998)	0.29	0.29	0.29	0.74	0.29	0.33	0.53	0.29	0.33	0.36	0.22	0.22
année 1998	volume écoulé du 20/8 au 20/10	3712	4629	5129	1901	1524	9575	6219	2463	14548	11130	2727	2393
	fréquence de dépassement (période 1950-1998)	0.50	0.50	0.52	0.95	0.62	0.46	0.56	0.44	0.36	0.52	0.11	0.07
	fréquence de dépassement (période 1970-1998)	0.19	0.19	0.22	0.91	0.36	0.16	0.26	0.12	0.05	0.22	0.02	0.02

tableau 2 : volumes écoulés sur le haut bassin du Sénégal entre le 20 août et le 20 octobre, pour les années 1997 et 1998. Comparaison avec les valeurs obtenues depuis 1970 ou 1950 sur la même période

		apports contrôlés aux stations										apports intermédiaires non contrôlés	
		Bafing	Bafing	Bafing		Bakoye	Sénégal		Falémé	Sénégal		entre Manantali, oualia et Kayes	entre Kayes, Gourbassy et Bakel
		Daka Saidou	Makana	Manantali		Oualia	Kayes		Gourbassy	Bakel			
		naturel	naturel	naturel	observé	naturel	naturel	artificiel	naturel	naturel	artificiel	naturel	naturel
crue sur 1 jour	débit dépassé pendant 1 jour	1105	1532	1580	1927	943	3047	2986	1270	5263	4695	1170	2082
	fréquence de dépassement (période 1950-1998)	0.64	0.52	0.54	0.36	0.52	0.50	0.50	0.34	0.32	0.34	0.32	0.05
	fréquence de dépassement (période 1970-1998)	0.47	0.29	0.29	0.12	0.19	0.19	0.19	0.09	0.05	0.09	0.22	0.02
crue sur 5 jours consécutifs	débit dépassé pendant 5 jours consécutifs	898	1111	1239	1608	484	2437	2144	1014	4222	3591	1049	950
	fréquence de dépassement (période 1950-1998)	0.70	0.60	0.60	0.38	0.58	0.50	0.60	0.38	0.36	0.46	0.15	0.19
	fréquence de dépassement (période 1970-1998)	0.53	0.40	0.40	0.09	0.29	0.22	0.33	0.12	0.09	0.19	0.05	0.02
crue sur 10 jours consécutifs	débit dépassé pendant 10 jours consécutifs	671	831	964	1525	324	2342	2113	595	4048	3317	857	552
	fréquence de dépassement (période 1950-1998)	0.87	0.64	0.64	0.24	0.72	0.40	0.52	0.42	0.34	0.42	0.11	0.15
	fréquence de dépassement (période 1970-1998)	0.78	0.43	0.43	0.05	0.53	0.12	0.26	0.12	0.05	0.16	0.05	0.05

tableau 3 : débits caractéristiques de la crue de 1998, sur 1, 5 et 10 jours consécutifs

Gestion réalisée, et débits observés sur le haut bassin du Sénégal

L'analyse de la gestion réalisée est faite à partir du 20 août, date de début théorique du soutien de crue. Les différents volumes écoulés entre le 20 août et le 20 octobre ont été évalués pour l'année 1997 et l'année 1998, et comparées aux valeurs obtenues chaque année sur la même période depuis 1950 et depuis 1970. Les valeurs obtenues pour ces volumes, ainsi que les fréquences au dépassement correspondantes, sont portées sur le **tableau 2**. La pointe de crue de 1998 est analysée dans le **tableau 3**, qui donne les valeurs maximales de débit dépassé pendant 1, 5 ou 10 jours consécutifs. Dans ces tableaux, les valeurs relatives au régime naturel ont été évaluées de la façon suivante pour les stations influencées par le barrage :

- Manantali : par modèle de propagation utilisant en entrée les débits observés à Bafing Makana. Ce modèle est calé sur les années d'observation antérieures à l'édification du barrage.
- Kayes : les données connues de débit lâché à partir du barrage depuis l'année 1987 sont utilisées pour estimer le débit naturel à Kayes de la façon suivante :

$$Q_{\text{Kayes,Naturel}}(j) = Q_{\text{Kayes,Artificiel}}(j) + Q_{\text{Manantali,Naturel}}(j-2) - Q_{\text{Manantali,Artificiel}}(j-2)$$

- Bakel : même principe que pour Kayes

$$Q_{\text{Bakel,Naturel}}(j) = Q_{\text{Bakel,Artificiel}}(j) + Q_{\text{Manantali,Naturel}}(j-3) - Q_{\text{Manantali,Artificiel}}(j-3)$$

Les volumes mentionnés dans la colonne "apports non contrôlés" sont évalués à partir des débits fictifs suivants :

Entre Manantali, Oualia et Kayes : $Q_{\text{inter1}}(j) = Q_{\text{Kayes}}(j+2) - Q_{\text{Manantali}}(j) - Q_{\text{Oualia}}(j)$

Entre Kayes, Gourbassy et Bakel : $Q_{\text{inter2}}(j) = Q_{\text{Bakel}}(j+1) - Q_{\text{Kayes}}(j) - Q_{\text{Gourbassy}}(j)$

Au pas de temps mensuel, ces débits fictifs donnent une bonne évaluation du bilan de volume écoulé entre les stations amont et aval, prenant en compte à la fois les apports intermédiaires non contrôlés et les pertes éventuelles. Au pas de temps journalier, ils donnent une idée plus approximative des apports et pertes intermédiaires pour les deux raisons suivantes :

- l'amortissement des débits entre les stations se traduit par des phénomènes de stockage-déstockage dans le lit, d'importance non négligeable au pas de temps journalier ;
- on adopte une valeur moyenne constante de décalage de temps entre les stations, alors que les temps de propagation varient en fonction du débit.

Apports dans la retenue de Manantali

Le volume de crue naturel mesuré en 1998 aux stations de Daka Saidou et Makana, et estimé à Manantali, est médian pour la période 1950-1998, et de récurrence quinquennale humide pour la période 1970-1998. La pointe de la crue (**figures 1 et 2**) est plus modérée que son volume, avec un débit caractéristique sur 5 ou 10 jours, dépassé plus de 6 années sur 10 pour la période 1950-1998, et plus de 4 années sur 10 sur la période 1970-1998.

Débits lâchés par le barrage

Le soutien de crue destiné à réaliser l'hydrogramme "ORSTOM3" a commencé le 26 août, avec une montée progressive du débit lâché atteignant 1927 m³/s le 1^{er} septembre (**figure 3**). A partir du 2 septembre, le débit lâché diminue jusqu'à s'annuler quasiment à partir du 9. Le soutien de crue n'a donc duré que 15 jours, la fin de l'hydrogramme objectif étant largement dépassée avec les seuls apports naturels non contrôlés par le barrage. La crue observée en

1998 à l'aval immédiat du barrage présente un volume très faible (vingtennal sec sur 1950-1998, et décennal sec sur 1970-1998), avec une pointe très forte (triennal humide sur 1950-1998 et décennal humide sur 1970-1998).

Stockage net dans la retenue

La différence de volume écoulé entre régime naturel (valeur médiane) et régime artificiel (valeur vingtennale sèche), se traduit par un stockage net très important accumulé dans la retenue (**figure 4**). Entre le 20 août et le 20 octobre, le volume retenu derrière le barrage est ainsi passé de 6,926 km³ à 9,958 km³, avec un gain de 3,032 km³ en 61 jours représentant un débit moyen stocké de 575 m³/s. Le stockage net s'est poursuivi jusqu'au 5 décembre, date à laquelle le niveau du lac, stabilisé depuis le 16 novembre, atteignait 206,15m, représentant un volume stocké de 10,444 km³. L'objectif de remplissage de la retenue (11,301 km³) envisagé pour fin 2000 a donc été quasiment atteint deux années à l'avance.

Apports de la Falémé

Autant pour le volume que pour la pointe, la crue de 1998 a été très forte sur la Falémé (**figure 5**): dépassée seulement 4 années sur 10 sur la période 1950-1998, et décennale humide sur la période 1970-1998.

Apports du Bakoye

Contrairement au reste du haut bassin du Sénégal, le bassin du Bakoye n'a donné qu'une crue assez modeste en 1998 (**figure 6**), avec un volume et une pointe dépassés environ 6 années sur 10 sur la période 1950-1998. Le volume écoulé à Oualia pendant la crue de 1998 est inférieur à celui de 1997, à l'inverse des stations situées sur la Falémé et le haut Bafing.

Débit du Sénégal à Kayes

Le Sénégal a présenté en 1998, une forte crue naturelle dont le volume et la pointe ne sont dépassés que 4 ou 5 années sur 10 sur la période 1950-1998, et 1 ou 2 années sur 10 sur la période 1970-1998. Cette crue naturelle à deux pointes très distinctes, séparées de plus de 20 jours (**figure 7**), a été remplacée en régime artificiel par une crue à pointe unique de hauteur équivalente, mais de volume beaucoup plus réduit.

Débit du Sénégal à Bakel

Sur les 29 années de la période 1970-1998, seule la crue de 1974 dépasse la crue de 1998 évaluée en régime naturel. Sans la régularisation opérée à partir du barrage, cette dernière aurait été très forte, avec une pointe (5263 m³/s) et un volume dépassés moins de 4 années sur 10 sur la période 1950-1998. Le stockage important réalisé cette année dans la retenue de Manantali s'est traduit par une réduction importante de la pointe et surtout du volume de la crue (**figure 8**), par rapport à ceux du régime naturel. Les deux corps de crue nettement différenciés en régime naturel ont par ailleurs été gommés pour réaliser une crue à corps unique, nettement plus favorable pour les cultures de décrue.

La crue observée reste forte néanmoins, avec un volume médian par rapport à l'ensemble des crues observées depuis 1950. A partir du 7 septembre, elle se situe nettement au dessus de l'hydrogramme objectif retenu pour 1998 (**figure 9**). Au sujet de l'excès de débit obtenu, on peut faire les commentaires suivants :

- La pointe du 8 au 10 septembre n'aurait pu être partiellement évitée qu'en disposant au minimum, à partir du 5 septembre, d'une prévision de type météorologique à l'horizon 2 ou 3 jours sur la partie nord du bassin, et d'un modèle hydro-pluviométrique calé sur cette zone jusqu'à Bakel. Ce sont les pluies tombées sur cette zone qui ont en effet provoqué, avec un temps de réponse très bref, une pointe de débit extrêmement brutale.

La pointe du 8 au 10 septembre était donc inévitable dans le cadre de la gestion adoptée pour le barrage.

- L'excès de débit du 11 septembre aurait pu être partiellement évité à condition d'appliquer dès le 8 septembre, une correction de débit en boucle fermée faisant intervenir le débit instantané du matin observé à Kayes, au lieu du débit moyen journalier observé la veille. Ce type de correction n'a pu être mis en place qu'à partir du 9, suite à un problème de liaison téléphonique entre Montpellier et Manantali.
- Même en fermant complètement le barrage (au débit sanitaire près) à partir du 5 septembre au lieu du 9 comme on l'a fait, les débits obtenus du 8 au 12 septembre auraient quand même dépassé l'objectif, mais de façon moins grave, comme le montre la **figure 9**.
- L'excédent de débit observé à partir du 13 septembre est obtenu avec une contribution du barrage limitée au débit sanitaire. Il était donc impossible à éviter.

On remarque enfin que la pointe de crue naturelle se situe environ 15 jours après la pointe de l'hydrogramme objectif retenu. La date optimale de ce dernier a été calée sur les années postérieures à 1970. La crue de cette année est plutôt comparable à celles des années antérieures à 1970, pour lesquelles le calage optimal du début de palier est plus tardif de 5 jours.

Débits non contrôlés, intermédiaires entre Manantali, Oualia, Gourbassy et Bakel

Compte tenu du mode d'évaluation adopté pour les débits des apports non contrôlés, on s'intéressera peu aux valeurs maximales journalières de ces derniers, indiquées pour mémoire dans le tableau 3. Leurs valeurs caractéristiques maximales sur 5 ou 10 jours sont par contre plus consistantes. Elles nous montrent que pendant la crue de 1998, le débit des apports intermédiaires a présenté une pointe dépassée seulement 1 ou 2 années sur 10 depuis 1950. Le volume de ces apports, jamais observé depuis 1970, est atteint seulement 1 année sur 10 depuis 1950. Ces résultats concernent à la fois les apports entre Manantali, Oualia et Kayes, et les apports entre Kayes, Gourbassy et Bakel. L'année 1998 est exceptionnelle pour l'importance des apports non contrôlés de la partie nord du haut bassin. Avec un volume écoulé de 5,12 km³ entre le 20 août et le 20 octobre, ces derniers représentent 35% du volume naturel évalué de la crue naturelle à Bakel, et 46% du volume de la crue régularisée observée.

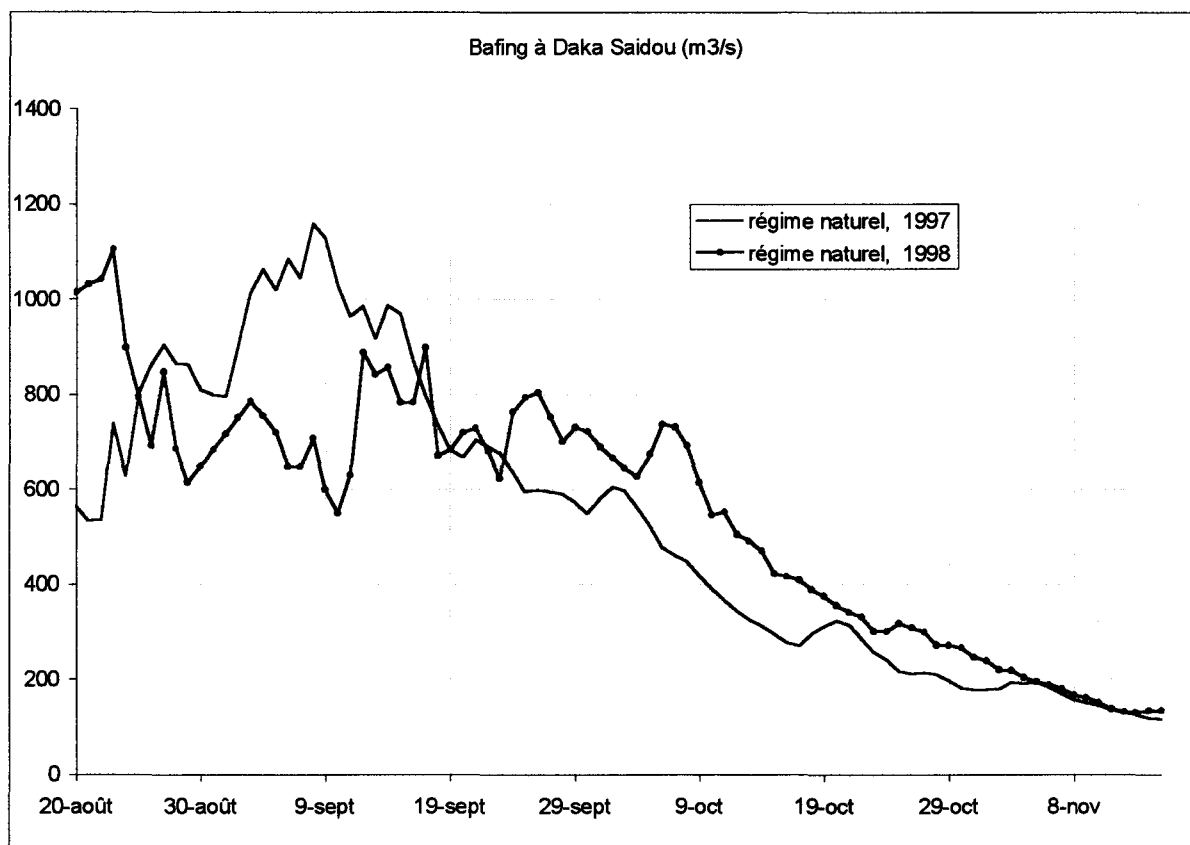


figure 1 : crue du Bafing à Daka Saidou, 1997 et 1998.

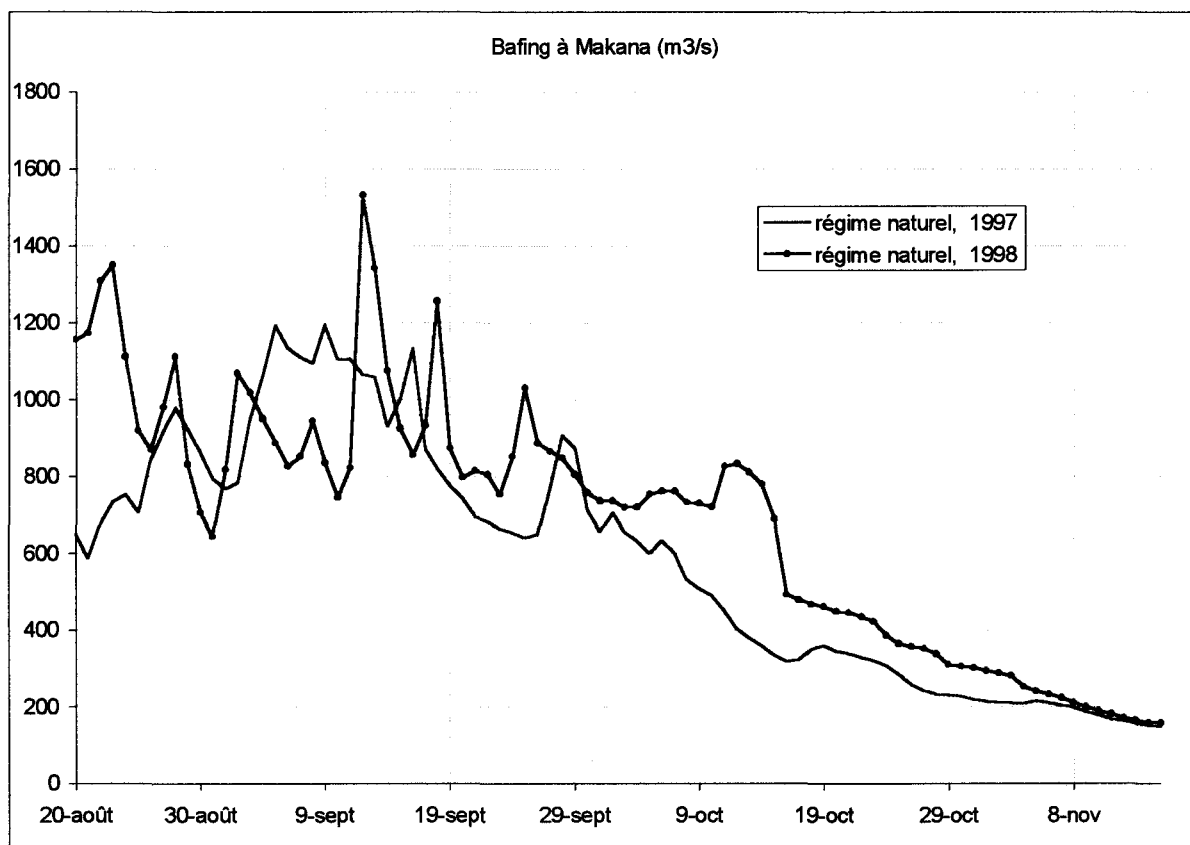


figure 2 : crue du Bafing à Makana, 1997 et 1998

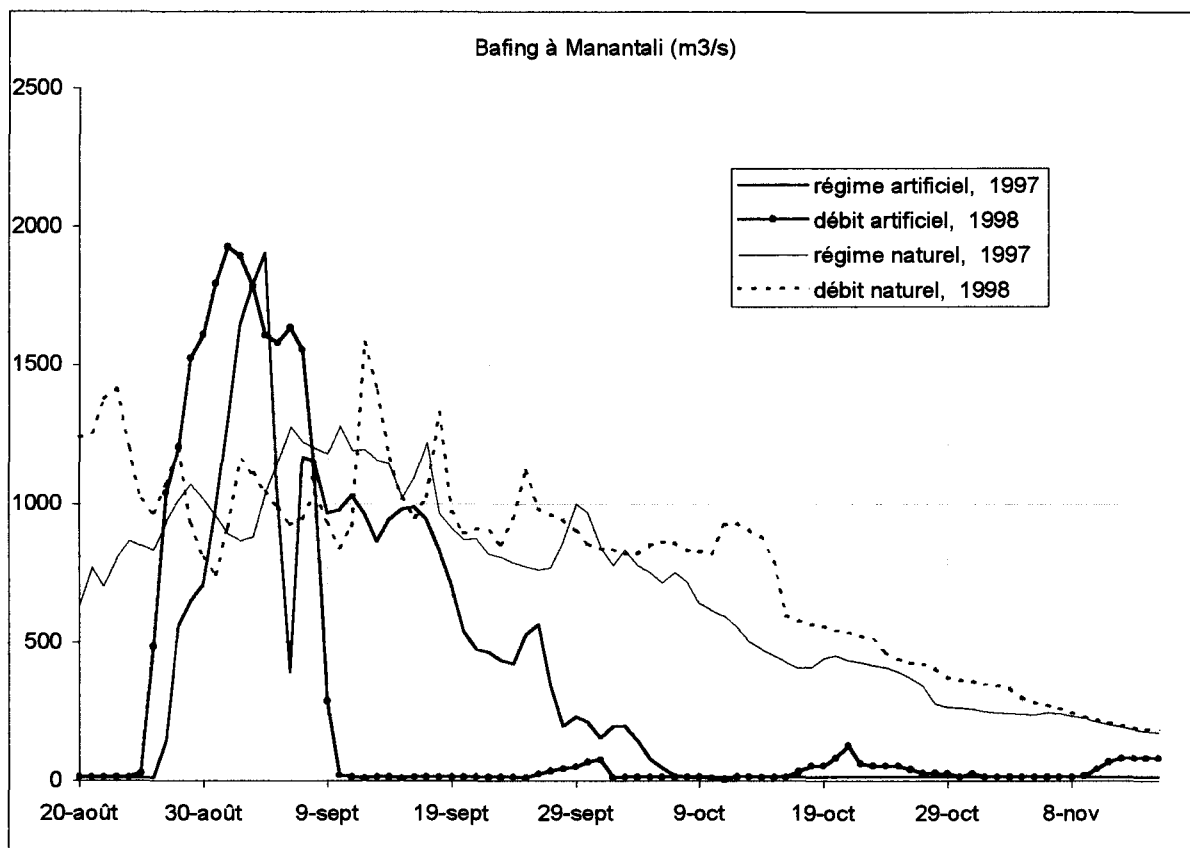


figure 3 : crue du Bafing à Manantali, 1997 et 1998

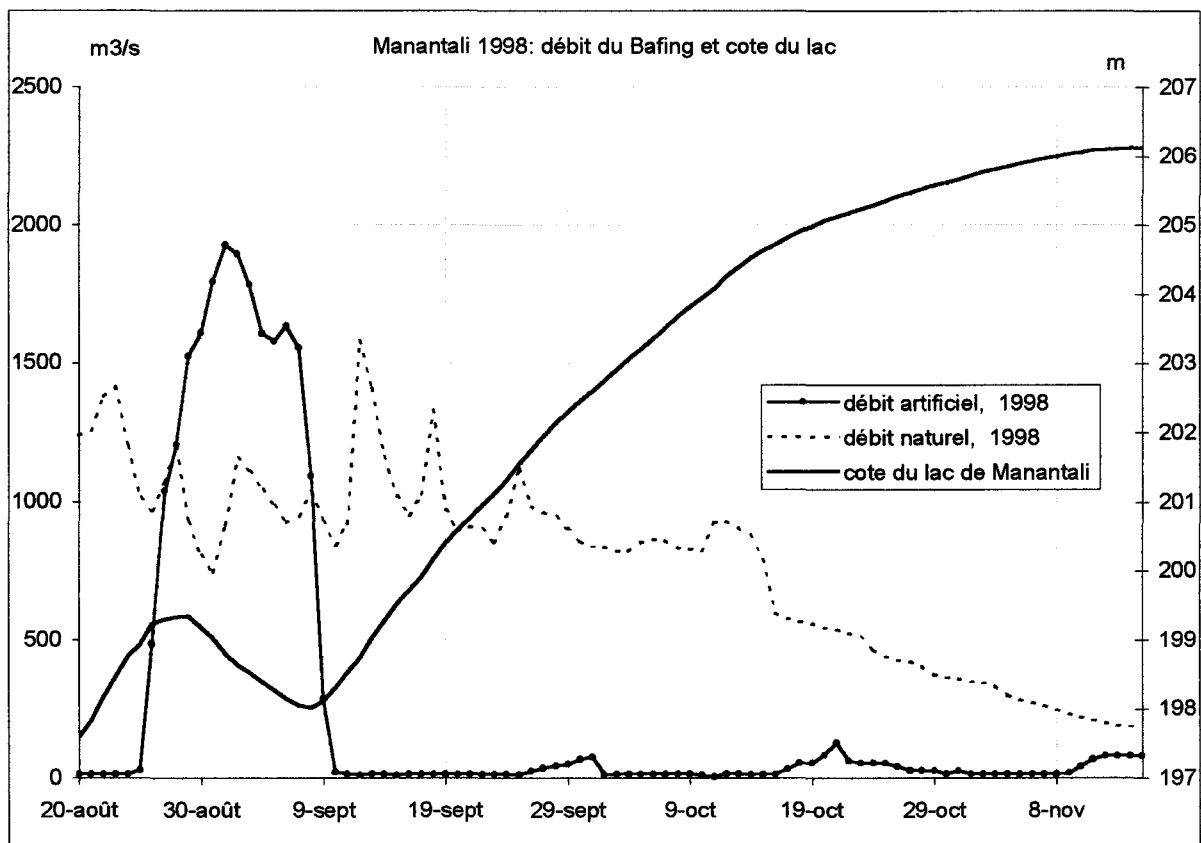


figure 4 : Manantali 1998. Crue du Bafing et cote dans le lac

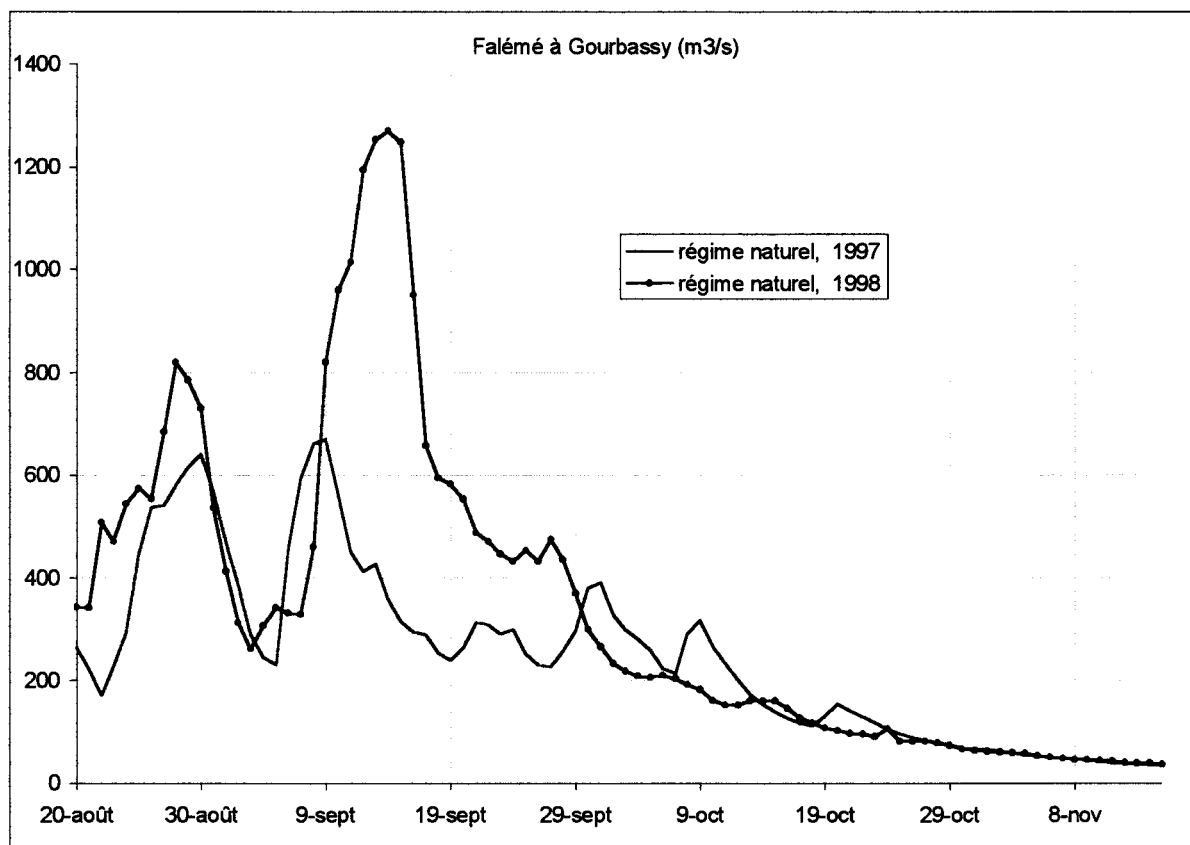


figure 5 : crue de la Falémé à Gourbassy, 1997 et 1998

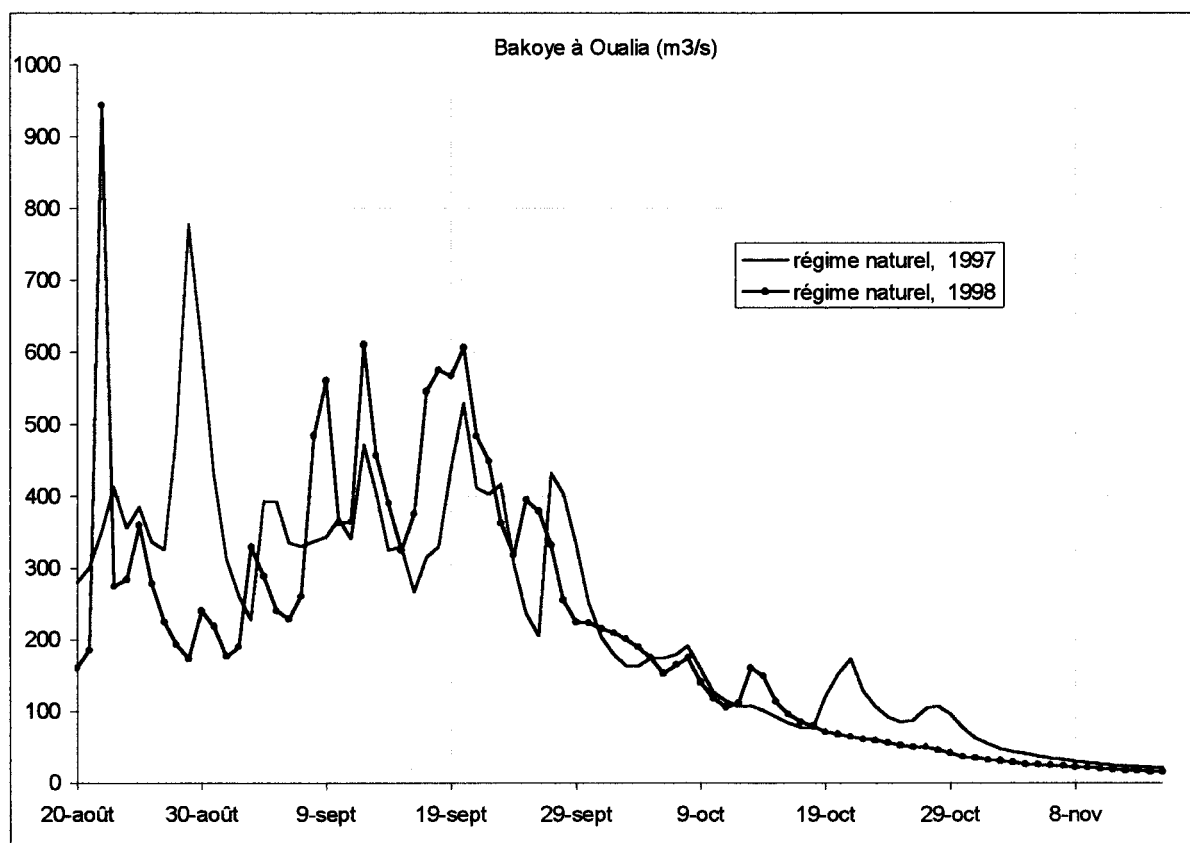


figure 6 : crue du Bakoye à Oualia, 1997 et 1998

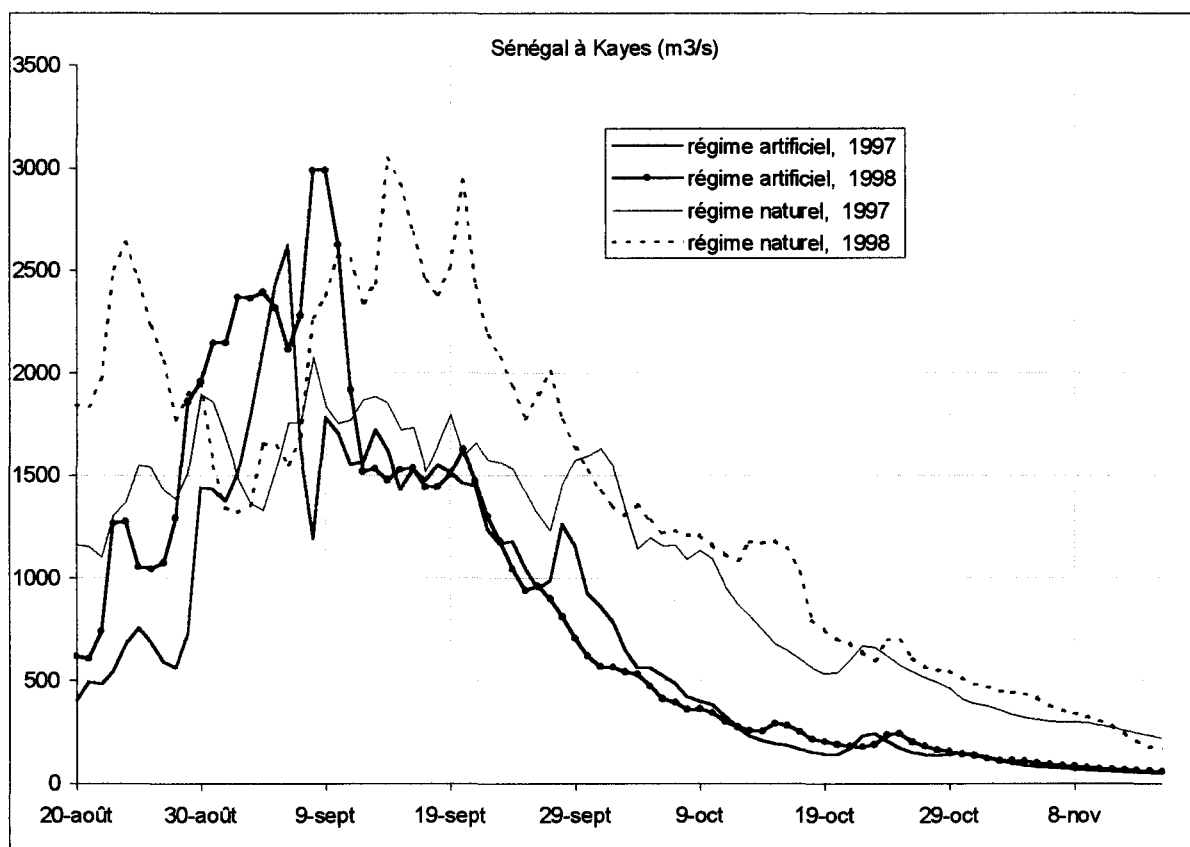


figure 7 : crue du Sénégal à kayes, 1997 et 1998

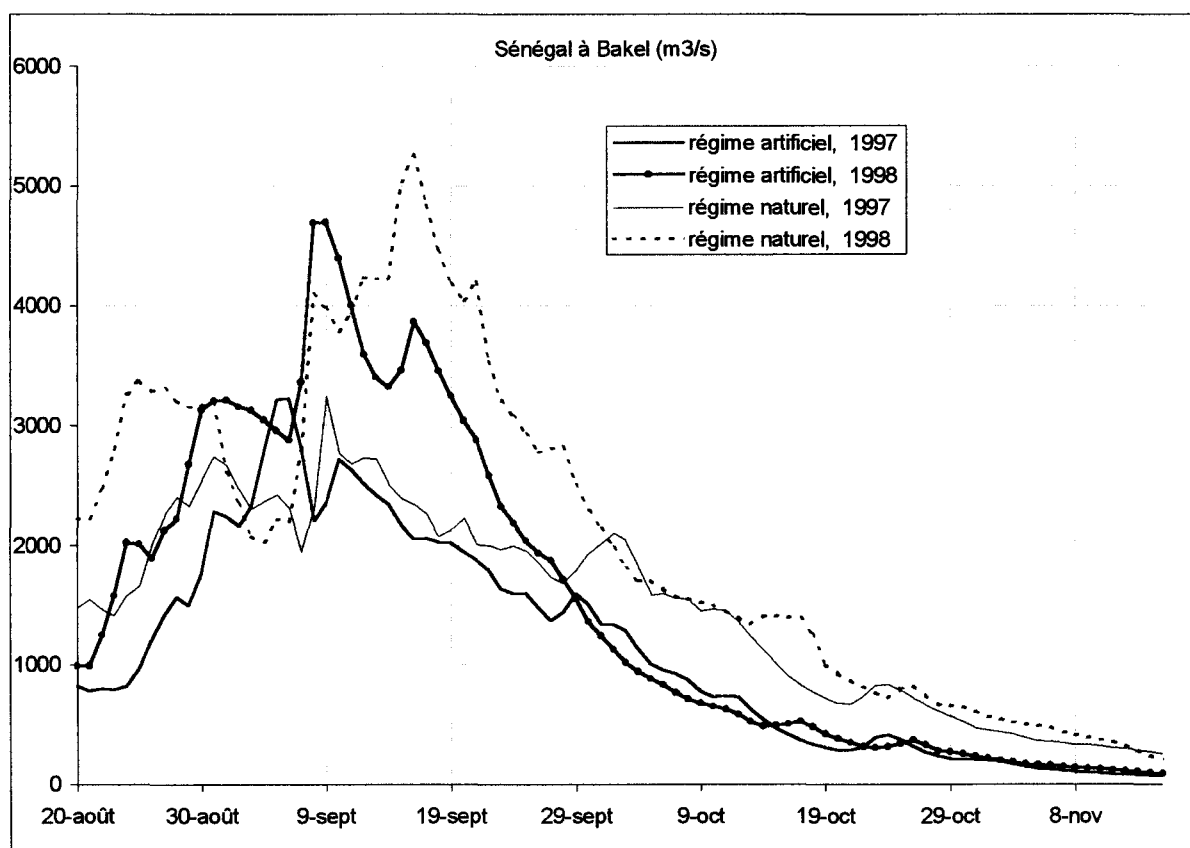


figure 8 : crue du Sénégal à Bakel, 1997 et 1998

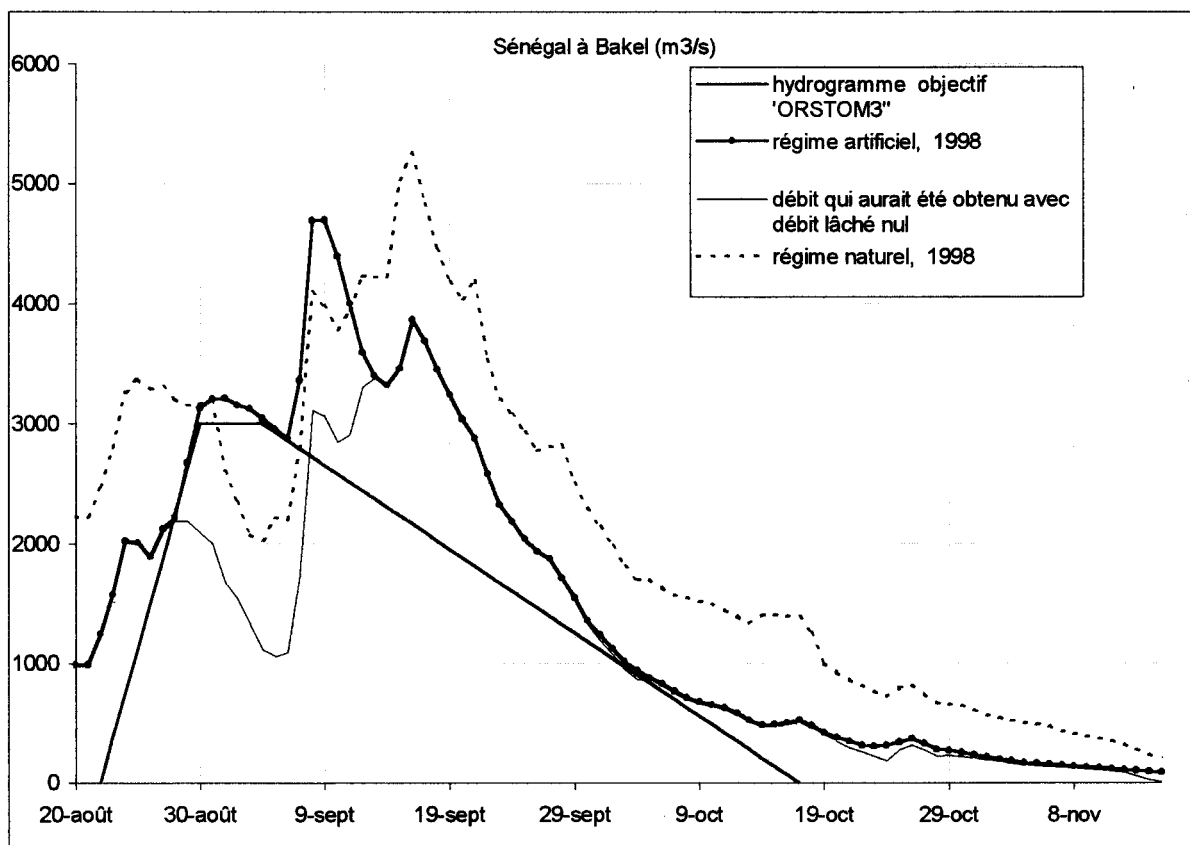


figure 9 : crue du Sénégal à Bakel en 1998

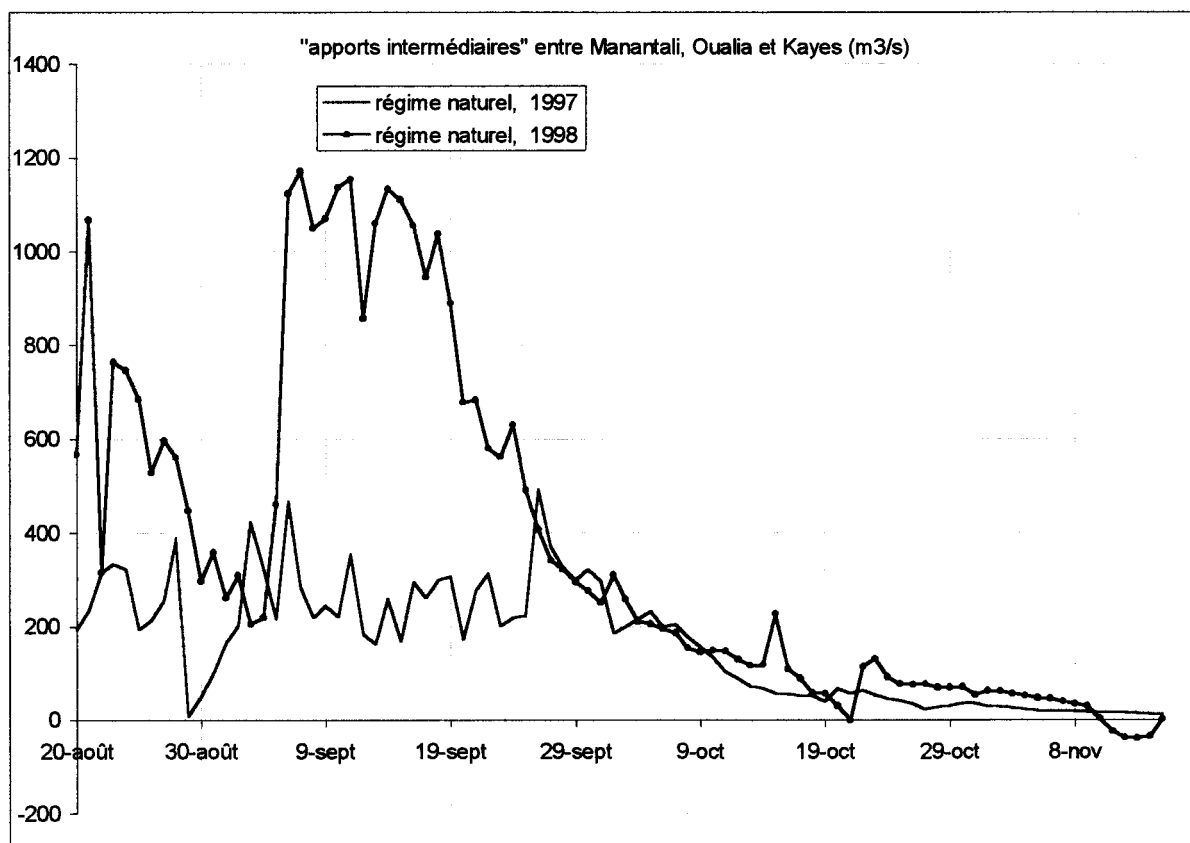


figure 10 : apport de crue non contrôlés entre Manantali, Oualia et Kayes, 1997 et 1998

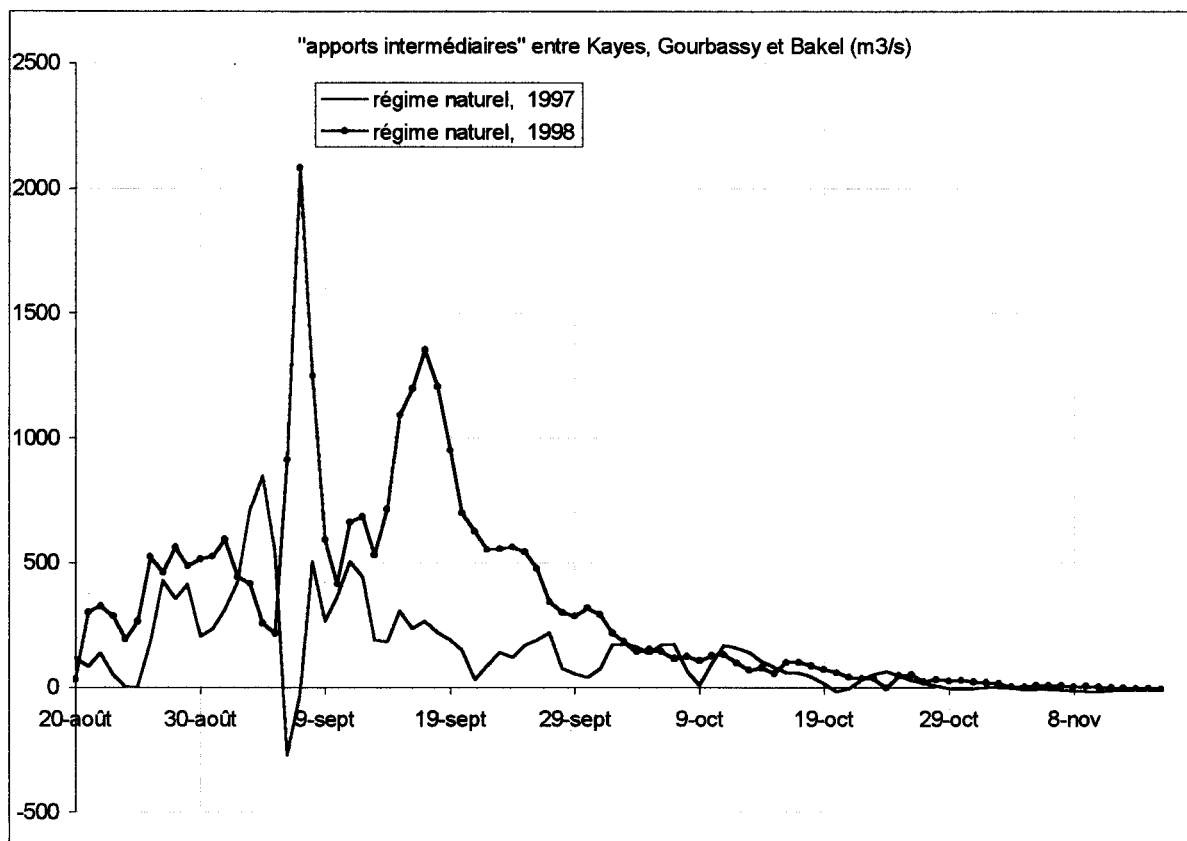


figure 11 : apports de crue non contrôlés entre Kayes, Gourbassy et Bakel, 1997 et 1998

Bilan de volume écoulé à l'aval de Bakel pendant la crue de 1998

La station de Bakel permet de mesurer la totalité de l'écoulement du fleuve, y compris lors des fortes crues. Il n'en va pas de même pour les stations situées à l'aval, pour lesquelles au delà d'une certaine cote, des écoulements non négligeables peuvent se produire dans le lit majeur ou certains défluent. D'après les informations recueillies dans la Monographie du Sénégal (Rochette, 1972) au sujet des écoulements dans le lit majeur, on peut estimer que ceux-ci ont été négligeables au droit de la station de Matam lors de la crue de 1998. Par contre, dans les sections de Kaédi, Salde-Ngoui et Podor-Guede, il est possible qu'ils aient représenté des volumes assez importants, toutefois impossibles à déterminer. Les valeurs de volume écoulé présentées ci dessous pour ces trois sections ne concernent que le lit mineur et ne sont donc que les limites inférieures des valeurs relatives à toute la largeur de la vallée.

La détermination des débits écoulés en 1998 dans le lit mineur du fleuve à l'aval de Bakel a été faite de la façon suivante (voir **annexe 5**): dans un premier temps, les séries de cotes moyennes journalières observées ont été traduites en débit à l'aide des étalonnages précédemment établis par la méthode du gradient limnimétrique ; certaines corrections ont ensuite été appliquées aux séries de débit obtenues, de façon à recaler ces dernières sur les mesures ponctuelles de débit qui ont pu être effectuées en 1998. Cette démarche a permis de constater que les étalonnages utilisés pour Bakel, Matam Salde donnent des résultats assez proches des débits mesurés en 1998. Il en va de même pour Podor en ce qui concerne les cotes non influencées par le barrage de Diama. Par contre, les étalonnages utilisés pour Ngoui et Guede semblent ne plus être valides, en sous-estimant et surestimant respectivement les valeurs mesurées en hautes eaux. Pour Kaédi, on ne peut rien conclure du fait qu'une seule mesure y a été effectuée en 1998.

Sur la période du 5 juin au 24 Novembre 1998, une série complète de débit moyen journalier a pu être établie pour les sections de Bakel, Matam, Salde-Ngoui et Podor-Guede. Pour Kaédi, cette série s'interrompt le 28 septembre. Les débits obtenus sont représentés sur la **figure 12**, où l'on constate le fort amortissement qui apparaît dès la section de Kaédi. La sommation de ces débits permet d'avoir le volume écoulé à partir du 5 juin dans le lit mineur des différentes sections. Ces volumes, représentés sur la **figure 13**, s'élèvent aux valeurs suivantes :

- Du 5 juin au 24 novembre : $13,9 \text{ km}^3$ à Bakel ; $13,4 \text{ km}^3$ à Matam ; $12,4 \text{ km}^3$ à Salde-
Ngoui et $12,2 \text{ km}^3$ à Podor-Guede.
- Du 5 juin au 28 septembre : $8,0 \text{ km}^3$ à Kaedi.

On en déduit les résultats suivants concernant le stockage net réalisé sur l'ensemble de la vallée (lit mineur + lit majeur) entre le 5 juin et le 24 novembre 1998 :

- Entre les sections de Bakel et Matam, le stockage net s'élève à $0,5 \text{ km}^3$
- Entre les sections de Matam et Salde-Ngoui, le stockage net est inférieur à $1,0 \text{ km}^3$;
- Entre les sections de Matam et Podor-Guede, le stockage net est inférieur à $1,2 \text{ km}^3$

figure 12 : débit écoulé (m³/s) entre le 5 juin et le 24 novembre 1998 dans la vallée du Sénégal (lit mineur)

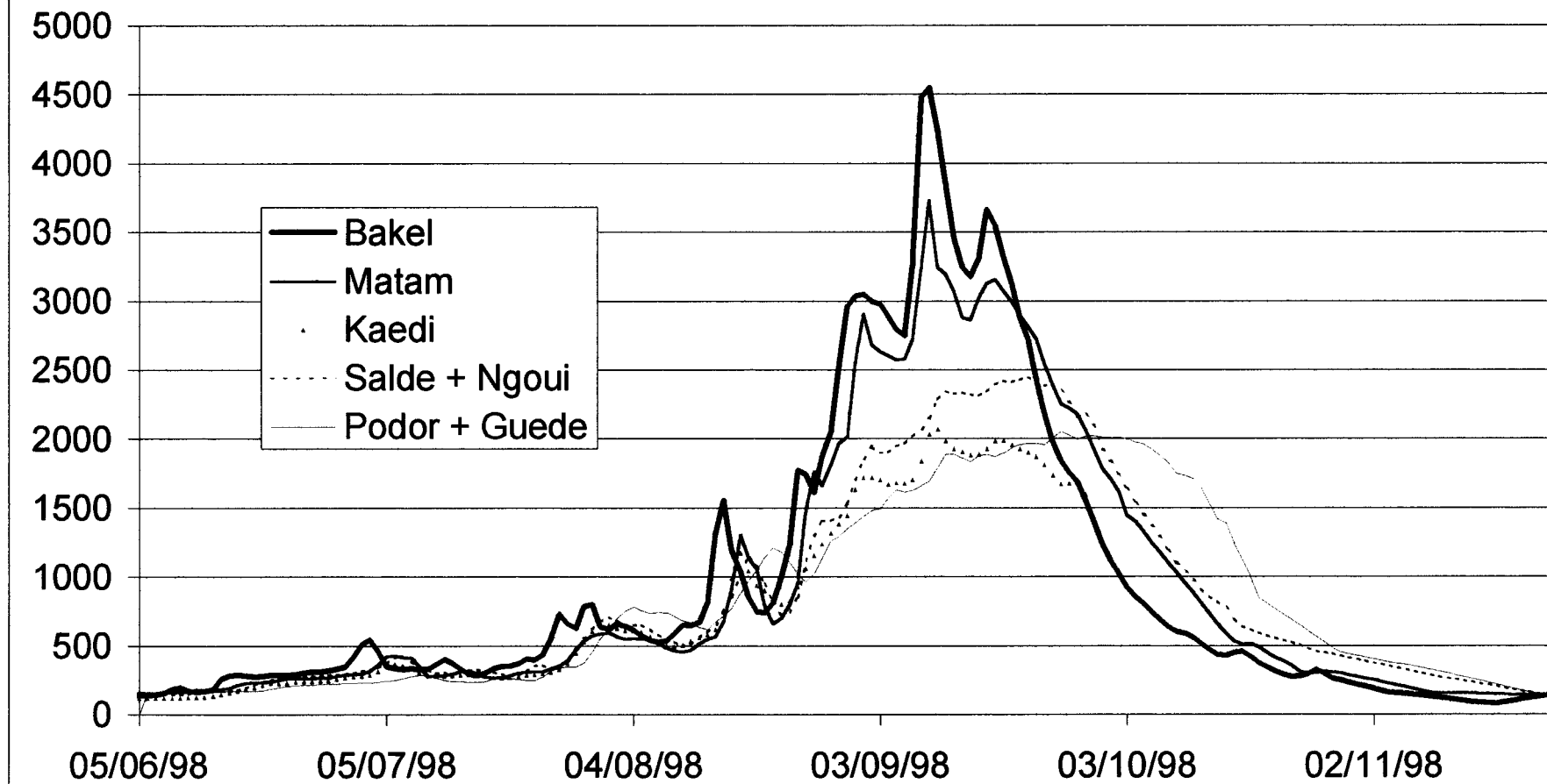
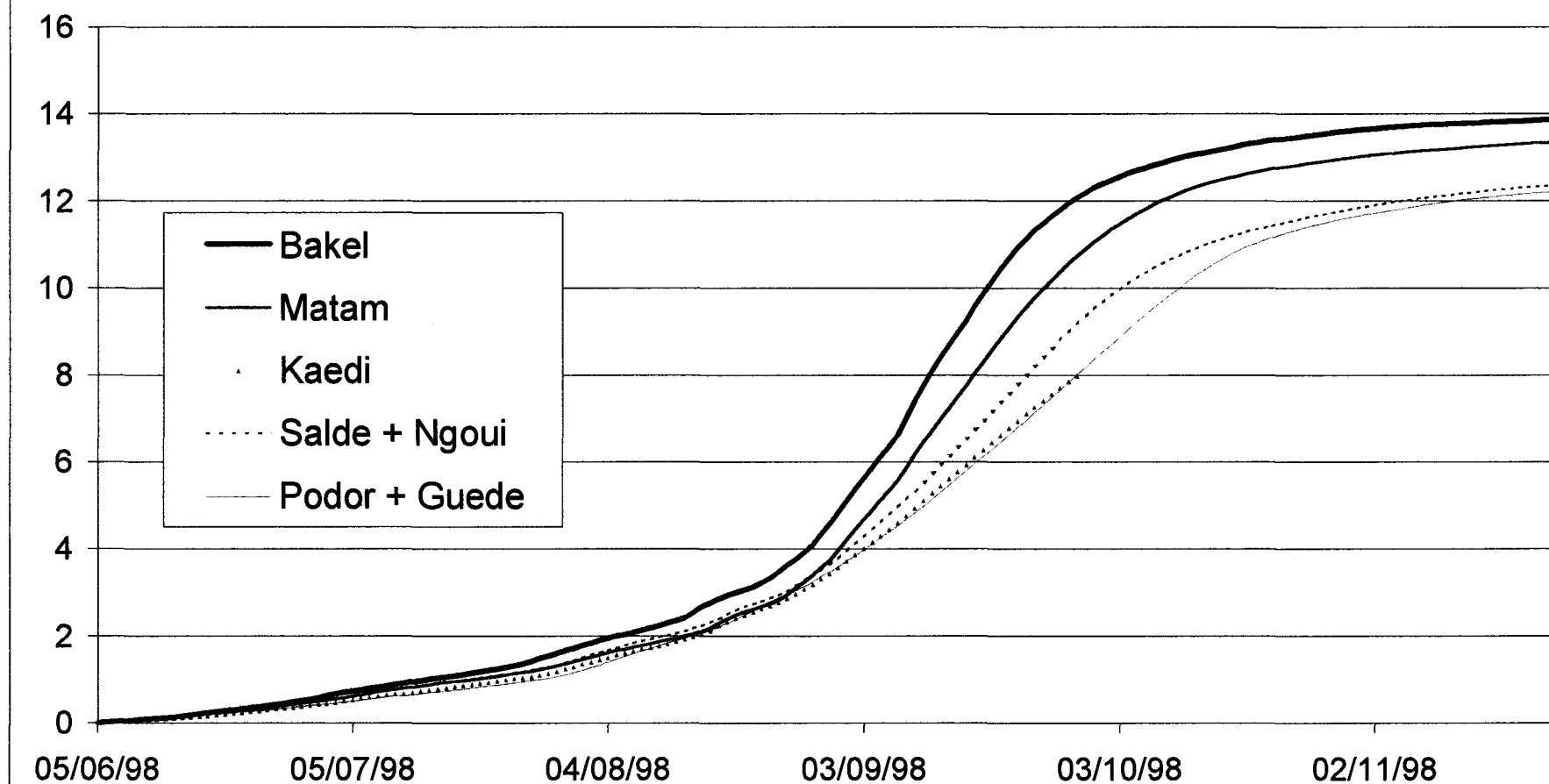


figure 13 : volume écoulé cumulé (km³) entre le 5 juin et le 24 novembre 1998 dans la vallée du Sénégal (lit mineur)



ANNEXE 1

Note sur la programmation du soutien de crue de 1998

+ addendum

Programmation du soutien de crue de 1998 sur le fleuve Sénégal.

Résumé

Une analyse statistique du stockage net annuel ou bisannuel dans la retenue de Manantali est effectuée, dans le cas d'un soutien de crue ORSTOM1 ou ORSTOM2 à date fixe suivi de différentes options de soutien d'étiage. Les résultats de cette analyse doivent permettre, en fonction de la cote qui sera atteinte dans le lac au 20 août 1998, d'estimer la cote qui sera probablement atteinte 1 ou 2 ans plus tard en fonction des options de soutien de crue et d'étiage qui seront retenues. On remarque qu'avec la ressource en eau disponible de 1970 à 1997, et compte-tenu de la capacité de la retenue, il aurait été possible de réaliser chaque année pendant cette période, un soutien de crue ORSTOM1 à date fixe suivi d'un soutien d'étiage à $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Même pour ces options de soutien de débit, on a cependant intérêt pour améliorer le productible électrique, à ne réaliser le soutien de crue que si un seuil de cote est atteint dans le lac au 20 août, et à "laisser passer" la crue naturelle dans le cas contraire. Les simulations numériques effectuées pour calculer le productible électrique seront prochainement affinées en prenant en compte les caractéristiques définitives des turbines, et en intégrant une consigne de gestion visant à préserver le stock nécessaire dans la retenue pour garantir le soutien d'étiage.

Objet de cette note

Lors de la réunion du comité de suivi du projet "Etude de la gestion des réservoirs de l'OMVS", qui s'est tenue à Dakar le 22/6/98, l'ORSTOM a proposé de réaliser en 1998 au niveau de Bakel, un hydrogramme objectif (dit "ORSTOM2") culminant à $3500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. L'intérêt de cet hydrogramme est de faciliter la compréhension et l'analyse des processus d'inondation du lit majeur dans la vallée, en créant une situation différente de celle qui a pu être observée en 1997 avec l'hydrogramme ORSTOM1.

Le comité a demandé à l'ORSTOM de présenter les éléments objectifs qui permettront le moment venu (vers le 20 août) à la Commission Permanente des Eaux, de décider quel hydrogramme adopter.

La présente note tente de répondre à cette demande par une analyse statistique des conséquences du soutien de crue ORSTOM1 ou ORSTOM2, au niveau du stockage d'eau dans la retenue.

Rappel des objectifs de gestion actuellement retenus

Les principaux objectifs sont actuellement au nombre de trois :

1- Remplissage de la retenue à l'horizon de l'an 2000 (cote 208,05m ; volume 11301 millions de m^3), afin de permettre à la production électrique de débiter dans des conditions optimales.

2- Soutien des débits de crue afin de permettre la pratique des cultures traditionnelles de décrue. Pendant la durée du projet, ce soutien de crue est par ailleurs nécessaire pour permettre l'analyse des processus d'inondation dans la vallée, qui vise à déterminer un hydrogramme "optimal". L'option actuellement retenue consiste à réaliser un hydrogramme objectif à date fixe optimale. L'option de soutien de crue à date mobile ne peut être envisagée pour le moment du fait des difficultés rencontrées pour mettre au point une prévision hydro-pluviométrique suffisamment fiable sur le haut bassin du Sénégal. Il a

cependant été montré que les volumes d'eau supplémentaires dépensés à partir de la retenue pour faire le soutien à date fixe plutôt qu'à date mobile sont relativement faibles. Les hydrogrammes actuellement envisagés sont les suivants :

- ORSTOM1 : $0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ le 22 août ; $2500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ le 28 août ; $2500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ le 2 septembre ; $0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ le 16 octobre.
- ORSTOM2 : $0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ le 22 août ; $2500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ le 28 août ; $3500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ le 31 août ; $3500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ le 5 septembre ; $0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ le 19 octobre.

3- Soutien des débits d'étiage. Le programme des demandes pour l'étiage 1998-1999 n'étant pas encore connu, on envisage dans cette note quatre options différentes pour le débit à garantir à Bakel en dehors de la crue : $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; $150 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; consignes 1997-1998 ($110 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ du 1^{er} mars au 15 juin ; $250 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ du 16 juin au début de la crue ; $90 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ le reste du temps).

Evaluation du stockage net annuel dans la retenue.

La décision de réaliser - ou non - le soutien de crue doit être prise au plus tard le 20 août, si l'on veut respecter le calage en temps optimal de l'hydrogramme objectif. Si le soutien est décidé pour la crue de 1998, le choix entre les hydrogrammes ORSTOM1 et ORSTOM2 doit par ailleurs être fait avant le 25 août.

Considérons que le soutien d'étiage devra de toute façon être réalisé en première priorité. La décision et le choix concernant le soutien de crue vont alors s'appuyer sur une comparaison entre les bénéfices attendus de ce soutien, et le volume d'eau à dépenser pour sa réalisation. L'élément décisif sera le niveau de risque que l'on accepte de prendre, de voir le remplissage de la retenue non réalisé à l'horizon 2000.

L'absence de prévision de débit à long terme ne permet pas de connaître le volume d'eau qui devra être déstocké du barrage pour réaliser le soutien de crue et le soutien d'étiage entre le 20 août 1998 et le 19 août 1999. Ce volume doit donc être estimé de façon statistique à partir de simulation numérique. Le principe est le suivant :

On simule le fonctionnement du barrage au pas de temps journalier sur la période 1970-1997. Les seules consignes de gestion prises en compte sont la réalisation systématique du soutien de crue et du soutien d'étiage. Aucune contrainte de gestion (dimensions de retenue, organes d'évacuation) n'est envisagée. Le calcul ainsi mené nous donne la chronique des débits journaliers lâchés d'un barrage de Manantali idéalement dimensionné, qui aurait permis de réaliser en permanence l'hydrogramme objectif de crue et d'étiage sur la période 1970-1997. Cette chronique permet d'évaluer une série de volumes annuels lâchés V_s , calculés du 20 août au 19 août de l'année suivante.

On connaît par ailleurs la chronique des débits journaliers du Bafing au droit du barrage de Manantali : données observées à la station de Soukoutali jusque 1983 ; données reconstituées à partir de celles de Bafing Makana à depuis 1984. Cette chronique nous permet d'évaluer une série de volumes annuels entrés V_e , calculés du 20 août au 19 août de l'année suivante.

Enfin nous considérons un volume moyen annuel V_p perdu par évaporation sur la retenue, égal à 832 millions de m^3 . Cette valeur correspond à une évaporation moyenne journalière de $5,7 \text{ mm jour}^{-1}$ (valeur mesurée par Cogels et Gac sur le lac de Guiers) et une superficie moyenne de 400 km^2 .

Les valeurs de V_e (régime naturel) sont données dans le tableau 1, ainsi que les huit séries de valeurs de V_s correspondant à la combinaison des deux options de soutien de crue

(ORSTOM1 et ORSTOM2) et des quatre options de soutien d'étiage (100 ; 150 et 200 m³ s⁻¹; consignes 1997-1998).

A partir de V_e , V_s et V_p , il est possible d'évaluer le stockage net annuel S_n dans la retenue :

$$S_n = V_e - V_s - V_p$$

Les séries de valeurs de S_n correspondant aux huit options de soutien de débit envisagées sont données dans le tableau 2, et représentées sur la figure 1. Elles représentent le gain théorique de volume emmagasiné chaque année dans la retenue entre le 20 août et le 19 août de l'année suivante. Elles sont à la base de l'analyse statistique menée plus bas.

On remarque que le soutien de crue ORSTOM1, suivi d'un soutien d'étiage à 100 m³ s⁻¹, 150 m³ s⁻¹ ou suivant les consignes 1997-1998, donne une moyenne interannuelle positive pour le stockage net annuel. Cela signifie que ces combinaisons de soutien de débit auraient été compatibles avec la ressource en eau disponible entre 1970 et 1997. Pour toutes les autres combinaisons, dont toutes celles qui incluent un soutien de crue ORSTOM2, la ressource aurait été insuffisante pour maintenir le stock d'eau emmagasiné dans le réservoir.

Capacité de retenue nécessaire

Comme il est dit plus haut, les simulations qui ont abouti aux valeurs de stockage net annuel S_n ont été faites en supposant une capacité de réservoir illimitée derrière le barrage. La capacité qui aurait été nécessaire pour pouvoir réaliser systématiquement le soutien de débit envisagé sur la période 1970-1997 peut être évaluée de la façon suivante :

Notons V_i le volume d'eau emmagasiné dans la retenue le 19 août de l'année $i+1$. Une valeur arbitraire V_{1969} étant attribuée au 19/8/1970, on en déduit les valeurs des années suivantes par :

$$V_i = V_{1969} + \sum_{j=1970 \dots i} (S_n)$$

La capacité C de retenue nécessaire est alors donnée par :

$$C = \text{MAX}_{i=1970 \dots 1996} [\text{MAX}_{j=1969 \dots i-1} (V_j) - V_i]$$

Les valeurs de C sont données dans le tableau 3. On constate que la capacité réelle de la retenue (11301 millions de m³) aurait permis de réaliser systématiquement le soutien de crue ORSTOM1 suivi d'un soutien d'étiage à 100 m³ s⁻¹ sur la période 1970-1997, en démarrant à retenue pleine le 19/8/70. Par contre, aucune des autres combinaisons de soutien de débit n'aurait pu être réalisée sans défaillance, du fait d'un manque de capacité de stockage dans la retenue. Une capacité atteignant presque 10 fois la capacité réelle aurait été nécessaire pour réaliser sans défaillance de 1970 à 1997, le soutien de crue ORSTOM2 suivi d'un soutien d'étiage à 200 m³ s⁻¹.

Analyse statistique du stockage net annuel dans la retenue

Après tri par ordre décroissant des valeurs de stockage net annuel, une fonction de répartition naturelle a été appliquée sur chacune des huit séries obtenues. Cette fonction bornée entre les valeurs 0 et 1 donne la probabilité au dépassement du stockage net annuel. Elle est du type :

$$F = (i - 0,5) / n$$

avec i désignant le rang de la valeur, et n la taille de l'échantillon ($n=27$).

La figure 2 représente les huit fonctions de répartition obtenues. Le tableau 4 en donne par ailleurs quelques valeurs correspondant à des temps de retour caractéristiques. Ces statistiques pourront être utilisées le 20 août 1998 pour décider du soutien de crue à adopter. Leur interprétation peut être illustrée par les deux exemples suivants :

Exemple 1

Imaginons qu'au 20 août 1998, le volume d'eau emmagasiné dans la retenue s'élève à 5000 millions de m^3 . Si l'on décide de faire un soutien de crue ORSTOM2 suivi d'un soutien d'étiage à $100 m^3 s^{-1}$, le tableau 4 nous indique que le volume probablement emmagasiné dans la retenue au 19 août 1999 dépassera :

6868 millions de m^3 ($= 5000 + 1868$) avec une chance sur cinq

2802 millions de m^3 ($= 5000 - 2198$) avec une chance sur deux

1509 millions de m^3 ($= 5000 - 3491$) avec deux chances sur trois

Exemple 2

Imaginons que le volume emmagasiné dans la retenue s'élève à 6000 millions de m^3 au 20 août 1998, et que l'on désire obtenir avec trois chances sur cinq (probabilité 0,6) un volume au moins égal à 4500 millions de m^3 au 19 août 1999. Seules pourront alors être envisagées les combinaisons de soutien de débit offrant une probabilité 0,6 de stockage net annuel supérieur à -1500 millions de m^3 . La figure 2 nous montre que dans ce cas, il faudra choisir un soutien de crue ORSTOM1, suivi d'un soutien d'étiage à limité à 100 ou $150 m^3 s^{-1}$, ou respectant les consignes 1997-1998.

Analyse statistique du stockage bisannuel dans la retenue.

De la même façon qu'on l'a fait plus haut à l'horizon d'une année, il est possible d'analyser l'effet de tel ou tel soutien de débit sur le remplissage de la retenue à l'horizon de deux années. Ceci offre l'intérêt de nous mener à l'an 2000, date pour laquelle on espère disposer d'une retenue pleine pour commencer la production électrique.

Nous envisagerons les deux cas suivants pour le soutien de crue : hydrogramme ORSTOM1 réalisé pendant deux années consécutives ; hydrogrammes ORSTOM1 et ORSTOM2 réalisés consécutivement dans un ordre quelconque. Le cas d'une réalisation d'hydrogramme ORSTOM2 pendant deux années consécutives ne sera pas envisagé.

Ces deux options de soutien de crue seront combinées aux quatre options de soutien d'étiage envisagées plus haut.

A partir des séries de 27 valeurs de stockage net annuel obtenues plus haut, on élabore des séries de 729 ($= 27 \times 27$) valeurs de stockage net bisannuel, correspondant à la totalité des combinaisons possibles de deux stockages nets annuels successifs pour les cas de soutien de débit retenus. Ces séries de stockage net bisannuels font ensuite l'objet d'une analyse statistique, dont les résultats sont présentés dans le tableau 5 et sur la figure 3.

L'interprétation de ces résultats se fait suivant le même principe que pour le stockage annuel. Par exemple le tableau 5 nous montre que si l'on réalise un soutien de crue ORSTOM1 suivi d'un soutien d'étiage à $100 m^3 s^{-1}$ pendant deux années consécutives, on a une chance sur deux d'obtenir au 19 août 2000 un volume emmagasiné supérieur d'au moins 1828 millions de m^3 , par rapport à celui du 20 août 1998.

Remarque : la date précise pour laquelle on espère obtenir une retenue pleine (cote 208,05 m) n'a pas été portée à la connaissance de l'ORSTOM. Il est certain de toute façon que cette date ne doit pas se situer entre juillet et octobre 2000, mais plutôt vers la fin de l'an 2000, du fait qu'il est nécessaire de conserver une revanche suffisante dans la retenue pour assurer le laminage d'éventuelles fortes crues. A titre indicatif (résultats obtenus avec le logiciel Simulsen, sur la période 1950-1997), il est nécessaire que la cote du lac au 19 août ne dépasse pas les valeurs suivantes, pour éviter les risques d'échec de laminage indiqués :

205,24 m : risque une année sur 25 de ne pouvoir laminer à $4500 m^3 s^{-1}$ le débit à Bakel

207,28 m : risque une année sur 10 de ne pouvoir laminer à $4500 m^3 s^{-1}$ le débit à Bakel

207,77 m : risque une année sur 25 de ne pouvoir laminer à $5000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ le débit à Bakel

Cote du lac au 20 août conditionnant le déclenchement du soutien de crue. Influence sur le productible énergétique

Le productible énergétique du barrage de Manantali a été évalué sur la période 1970-1997 par simulation numérique au pas de temps journalier, dans le cas d'un soutien de crue ORSTOM1 à date fixe déclenché si le niveau du lac dépasse une certaine cote limite au 20 août. Différentes valeurs ont été testées pour cette cote limite, afin d'en évaluer l'effet sur le productible énergétique.

Faute de temps, les caractéristiques définitives des turbines communiquées récemment par l'OMVS n'ont pu être prises en compte dans le calcul. On a donc utilisé celles qui étaient indiquées dans les rapports du bureau d'étude Gibb (1987).

Les consignes de gestion prises en compte pour le calcul sont les suivantes, par ordre de priorité décroissante :

- Respect du niveau maximum de sécurité (210,50m) admissible dans la retenue
- Demande de production électrique, lorsque la cote du lac est supérieure à 190 m. Une puissance constante de 90 MW est demandée. Toutefois, le maximum productible est demandé lorsqu'il est inférieur à 90MW ou lorsque le barrage déverse (cote supérieure à 208,05m). Si la cote est inférieure à 190m, aucune demande de production électrique n'est prise en compte.
- Lâcher permettant d'obtenir à Bakel un débit supérieur à une valeur constante. Trois options sont retenues pour cette constante : $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $150 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ou $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Cette consigne de débit réservé à Bakel concerne les besoins en eau des cultures irriguées, ainsi qu'éventuellement la navigation.
- Soutien de crue permettant de réaliser l'hydrogramme ORSTOM1 calé de telle façon que le premier jour de débit à $2500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ se situe le 28 août à Bakel. Chaque année, la décision de réaliser le soutien de crue est prise si le niveau du lac dépasse un certain seuil le 20 août. Les années pour lesquelles on décide de ne pas faire le soutien de crue, on "laisse passer" la crue naturelle. On lâche alors dans ce cas, pendant toute la durée théorique du soutien de crue, le maximum de débit permettant à la fois de maintenir le niveau dans le lac et de ne pas dépasser l'hydrogramme objectif.

Dans tous les cas, il est produit le maximum d'énergie productible en fonction du débit global lâché du barrage pour satisfaire les différentes demandes. Les simulations sont menées en supposant la retenue pleine (208,05m) le 1^{er} janvier 1970.

Remarque : Par manque de temps, aucune consigne n'a été prise en compte pour préserver un stock suffisant dans la retenue, permettant de garantir le soutien d'étiage envisagé. Il va de soi qu'une telle consigne devra être prise en compte, pour une simulation plus réaliste, dans les calculs qui seront effectués dès que possible avec les caractéristiques définitives des turbines. L'absence de cette consigne dans les calculs présentés ici entraîne une certaine diminution du productible énergétique, du fait qu'aucune limitation n'empêche le niveau du lac de descendre très bas.

Les résultats des simulations effectuées sont présentés dans les tableaux 6, 7 8 pour les options de soutien d'étiage à 100 , 150 et $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ respectivement. Globalement, le nombre important de crues non soutenues montre que le système fonctionne avec un niveau moyen de lac relativement bas. Le fait de "laisser passer" la crue naturelle en l'absence de soutien de crue en est en partie responsable, puisqu'il est difficile de reconstituer ainsi le stock d'eau dans la retenue. Une option consistant à ne lâcher, en absence de soutien de crue, que le débit nécessaire pour garantir le débit réservé à Bakel, offrirait de bien meilleurs résultats sur le plan de la production électrique.

Les pénuries d'eau observées en période d'étiage découlent de l'absence de prise en compte d'une consigne (mentionnée plus haut), visant à préserver le stock d'eau dans le lac.

Fort logiquement, l'augmentation du seuil de cote dans le lac conditionnant le soutien de crue, s'accompagne d'une augmentation du productible énergétique et d'une diminution de la fréquence du soutien de crue. L'augmentation du débit réservé à Bakel entraîne une diminution du productible, du fait qu'elle induit un surplus de lâchers sous faible hauteur de chute, et une diminution globale du niveau moyen du réservoir.

crue:	régime naturel	ORSTOM1				ORSTOM2			
étiage:	régime naturel	100 m ³ s ⁻¹	200 m ³ s ⁻¹	150 m ³ s ⁻¹	consignes 1997-1998	100 m ³ s ⁻¹	200 m ³ s ⁻¹	150 m ³ s ⁻¹	consignes 1997-1998
1970	9602	2974	5163	4043	3349	5856	8045	6925	6231
1971	8379	1950	4273	3087	2569	4117	6440	5254	4736
1972	7425	6562	9004	7767	7065	9642	12050	10829	10147
1973	7941	5488	7823	6646	5785	8652	10949	9796	8948
1974	9585	1980	4197	3070	2401	4264	6480	5353	4684
1975	9195	3058	5279	4154	3522	5442	7663	6538	5906
1976	8225	5612	7706	6641	6115	8369	10463	9398	8872
1977	5937	5545	7835	6653	6092	8588	10869	9687	9135
1978	7364	5302	7565	6414	5898	7977	10241	9090	8574
1979	5949	6838	9240	8021	7346	9918	12294	11092	10425
1980	7205	5488	7944	6700	5995	8571	10996	9769	9078
1981	5764	6256	8776	7496	6890	9276	11785	10525	9911
1982	6658	6066	8636	7320	6896	9069	11642	10328	9899
1983	6276	7810	10205	8984	8275	10885	13253	12047	11353
1984	4579	7869	10275	9050	8395	10893	13314	12087	11420
1985	6074	6390	8946	7620	7091	9470	11996	10687	10172
1986	6784	6186	8773	7453	6996	9226	11810	10490	10031
1987	7476	7050	9410	8204	7457	10144	12476	11284	10550
1988	6845	3315	5800	4538	3944	6278	8760	7498	6908
1989	7574	4852	7160	5984	5241	7849	10152	8978	8244
1990	6450	7260	9650	8438	7706	10304	12689	11487	10750
1991	8272	5643	8027	6799	6312	8651	11035	9807	9320
1992	6285	6548	9021	7774	7104	9569	12026	10790	10125
1993	5897	6383	8799	7572	6840	9461	11847	10637	9919
1994	9503	3707	5855	4770	4246	6068	8216	7131	6607
1995	8770	3431	5737	4571	3984	6152	8458	7292	6705
1996	8344	4590	6979	5752	5183	7599	9988	8761	8192

Tableau 1: Volume écoulé à Manantali entre le 20 août de l'année indiquée et le 19 août de l'année suivante

crue:	ORSTOM1				ORSTOM2			
étiage:	100 m ³ s ⁻¹	200 m ³ s ⁻¹	150 m ³ s ⁻¹	consignes 1997-1998	100 m ³ s ⁻¹	200 m ³ s ⁻¹	150 m ³ s ⁻¹	consignes 1997-1998
1970	5796	3608	4727	5422	2914	726	1845	2540
1971	5597	3274	4460	4978	3430	1107	2293	2811
1972	31	-2411	-1173	-472	-3049	-5457	-4236	-3554
1973	1621	-715	463	1324	-1543	-3841	-2687	-1840
1974	6772	4556	5683	6352	4489	2273	3399	4069
1975	5306	3084	4209	4841	2922	701	1825	2457
1976	1781	-313	752	1278	-976	-3069	-2005	-1479
1977	-439	-2729	-1547	-987	-3482	-5764	-4582	-4029
1978	1230	-1033	118	634	-1445	-3708	-2557	-2041
1979	-1721	-4124	-2904	-2229	-4801	-7177	-5975	-5309
1980	885	-1571	-327	378	-2198	-4623	-3396	-2705
1981	-1324	-3845	-2564	-1958	-4345	-6853	-5593	-4979
1982	-240	-2810	-1494	-1070	-3243	-5816	-4502	-4073
1983	-2366	-4762	-3540	-2831	-5442	-7809	-6603	-5909
1984	-4122	-6529	-5303	-4648	-7146	-9567	-8340	-7673
1985	-1147	-3703	-2378	-1849	-4228	-6754	-5445	-4930
1986	-234	-2820	-1501	-1044	-3274	-5857	-4538	-4079
1987	-406	-2766	-1560	-813	-3500	-5832	-4640	-3906
1988	2698	213	1475	2069	-265	-2747	-1485	-895
1989	1890	-418	758	1501	-1107	-3410	-2236	-1502
1990	-1643	-4032	-2821	-2088	-4687	-7071	-5869	-5132
1991	1797	-587	641	1128	-1212	-3595	-2367	-1880
1992	-1095	-3568	-2321	-1651	-4116	-6574	-5337	-4672
1993	-1317	-3734	-2507	-1775	-4396	-6782	-5572	-4854
1994	4964	2816	3901	4425	2603	455	1540	2064
1995	4507	2201	3368	3954	1787	-519	647	1234
1996	2923	534	1760	2329	-86	-2475	-1249	-680

Tableau 2: Stockage net annuel dans la retenue entre le 20 août de l'année indiquée et le 19 août de l'année suivante

soutien de crue:	ORSTOM1 chaque année				ORSTOM2 chaque année			
soutien d'étiage:	100 m ³ s ⁻¹	200 m ³ s ⁻¹	150 m ³ s ⁻¹	consignes 1997-1998	100 m ³ s ⁻¹	200 m ³ s ⁻¹	150 m ³ s ⁻¹	consignes 1997-1998
	10676	49130	27774	17233	59861	111872	82741	70047

Tableau 3: Capacité minimale nécessaire pour la retenue de Manantali (millions de m³), permettant la réalisation systématique des soutiens de crue et d'étiage envisagés, entre le 20/8/70 et le 19/8/97

soutien de crue:	ORSTOM1 chaque année				ORSTOM2 chaque année			
soutien d'été:	100 m³ s⁻¹	200 m³ s⁻¹	150 m³ s⁻¹	consignes 1997-1998	100 m³ s⁻¹	200 m³ s⁻¹	150 m³ s⁻¹	consignes 1997-1998
1 année sur 10	5539	3236	4410	4950	2920	721	1841	2523
1 année sur 5	4553	2263	3421	4001	1868	-422	736	1317
1 année sur 3	1843	-365	755	1412	-1041	-3240	-2120	-1491
1 année sur 2	885	-1571	-327	378	-2198	-4623	-3396	-2705
2 années sur 3	-423	-2815	-1554	-1057	-3491	-5845	-4611	-4076
4 années sur 5	-1318	-3745	-2513	-1860	-4350	-6789	-5574	-4935
9 années sur 10	-1706	-4105	-2887	-2201	-4778	-7156	-5954	-5273

Tableau 4: Stockage net annuel dans la retenue de Manantali (millions de m³) sur la période du 20 août au 19 août de l'année suivante. Fréquence de dépassement évaluée entre le 20/8/70 et le 19/8/97. Résultats obtenus par simulation numérique au pas de temps journalier (logiciel SIMULSEN), avec réalisation systématique d'un soutien de crue suivi d'un soutien d'été.

soutien de crue:	ORSTOM1 chaque année				ORSTOM1 et ORSTOM2 alternés			
soutien d'été:	100 m³ s⁻¹	200 m³ s⁻¹	150 m³ s⁻¹	consignes 1997-1998	100 m³ s⁻¹	200 m³ s⁻¹	150 m³ s⁻¹	consignes 1997-1998
1 année sur 10	7577	2985	5356	6550	4718	308	2583	3864
1 année sur 5	5628	878	3305	4589	2991	-1685	733	1913
1 année sur 3	4153	-564	1867	3019	1331	-3340	-975	233
1 année sur 2	1828	-2921	-532	806	-1180	-5803	-3477	-2108
2 années sur 3	332	-4431	-2045	-693	-2638	-7439	-4972	-3718
4 années sur 5	-1388	-6334	-3867	-2579	-4421	-9384	-6879	-5604
9 années sur 10	-2600	-7527	-5034	-3733	-5640	-10538	-8042	-6754

Tableau 5: Stockage net bisannuel dans la retenue de Manantali (millions de m³) sur la période du 20 août au 19 août de la deuxième année suivante. Fréquence de dépassement évaluée entre le 20/8/70 et le 19/8/97, par combinaison des valeurs de stockage net annuel obtenues par simulation numérique au pas de temps journalier (logiciel SIMULSEN).

Niveau minimal (m) du lac au 20 août permettant de faire le soutien de crue	puissance moyenne produite (MW)	Energie moyenne produite par année (GWh)	années sans soutien de crue	fréquence du soutien de crue	années avec pénurie en été
184	51.1	447.9	84; 86	0.93	
186	52.3	458.2	84; 85; 94	0.89	
188	53.5	468.2	80; 84; 85; 86; 94	0.82	
190	57.8	506.2	80; 82; 84; 85; 86; 87; 91; 93; 94	0.68	
192	65.1	570.5	78; 79; 80; 81; 82; 83; 84; 85; 86; 87; 89; 91; 92; 93; 94	0.46	
194	67.6	592.3	73; 78; 79; 80; 81; 82; 83; 84; 85; 86; 87; 89; 90; 91; 92; 93; 94; 96; 97	0.32	

Tableau 6: productible électrique obtenu dans le cas d'un soutien de crue de type ORSTOM1 à date fixe, suivi d'un soutien d'été à 100 m³ s⁻¹, pour différents seuils de déclenchement du soutien de crue. Période simulée: 1970-1997.

Niveau minimal (m) du lac au 20 août permettant de faire le soutien de crue	puissance moyenne produite (MW)	Energie moyenne produite par année (GWh)	années sans soutien de crue	fréquence du soutien de crue	années avec pénurie en étiage
184	41.0	358.7	80; 82; 83; 84; 85; 86; 87; 91; 93; 94;	0.64	80; 83; 85; 86; 91
186	45.7	400.1	80; 81; 82; 83; 84; 85; 86; 87; 91; 93; 94	0.61	80; 91
188	49.6	434.1	78; 80; 81; 82; 83; 84; 85; 86; 87; 89; 91; 92; 93; 94	0.50	80; 91
190	55.3	484.4	78; 79; 80; 81; 82; 83; 84; 85; 86; 87; 89; 90; 91; 92; 93; 94	0.43	
192	56.6	495.7	77; 78; 79; 80; 81; 82; 83; 84; 85; 86; 87; 89; 90; 91; 92; 93; 94; 97	0.36	
194	57.9	507.5	73; 77; 78; 79; 80; 81; 82; 83; 84; 85; 86; 87; 89; 90; 91; 92; 93; 94; 96; 97	0.29	

Tableau 7: productible électrique obtenu dans le cas d'un soutien de crue de type ORSTOM1 à date fixe, suivi d'un soutien d'étiage à 150 m³ s⁻¹, pour différents seuils de déclenchement du soutien de crue. Période simulée: 1970-1997.

Niveau minimal (m) du lac au 20 août permettant de faire le soutien de crue	puissance moyenne produite (MW)	Energie moyenne produite par année (GWh)	années sans soutien de crue	fréquence du soutien de crue	années avec pénurie en étiage
184	40.3	353.4	78; 79; 80; 81; 82; 83; 84; 85; 86; 87; 89; 90; 91; 94	0.50	78; 80; 81; 82; 83; 84; 85; 86; 87; 88; 91; 93; 94
186	40.3	353.4	78; 79; 80; 81; 82; 83; 84; 85; 86; 87; 89; 90; 91; 92; 93; 94	0.43	78; 80; 81; 82; 83; 84; 85; 86; 87; 88; 91; 93; 94;
188	42.2	369.6	77; 78; 79; 80; 81; 82; 83; 84; 85; 86; 87; 89; 90; 91; 92; 93; 94;	0.39	80; 81; 82; 83; 84; 85; 86; 87; 88; 91; 93; 94
190	42.6	373.0	77; 78; 79; 80; 81; 82; 83; 84; 85; 86; 87; 89; 90; 91; 92; 93; 94; 96	0.36	80; 81; 82; 83; 84; 85; 86; 87; 88; 91; 93; 94
192	44.3	388.0	73; 77; 78; 79; 80; 81; 82; 83; 84; 85; 86; 87; 89; 90; 91; 92; 93; 94; 96; 97	0.29	81; 82; 83; 84; 85; 86; 87; 88; 91; 93; 94
194	44.3	388.0	73; 77; 78; 79; 80; 81; 82; 83; 84; 85; 86; 87; 89; 90; 91; 92; 93; 94; 96; 97	0.29	81; 82; 83; 84; 85; 86; 87; 88; 91; 93; 94

Tableau 8: productible électrique obtenu dans le cas d'un soutien de crue de type ORSTOM1 à date fixe, suivi d'un soutien d'étiage à 200 m³ s⁻¹, pour différents seuils de déclenchement du soutien de crue. Période simulée: 1970-1997.

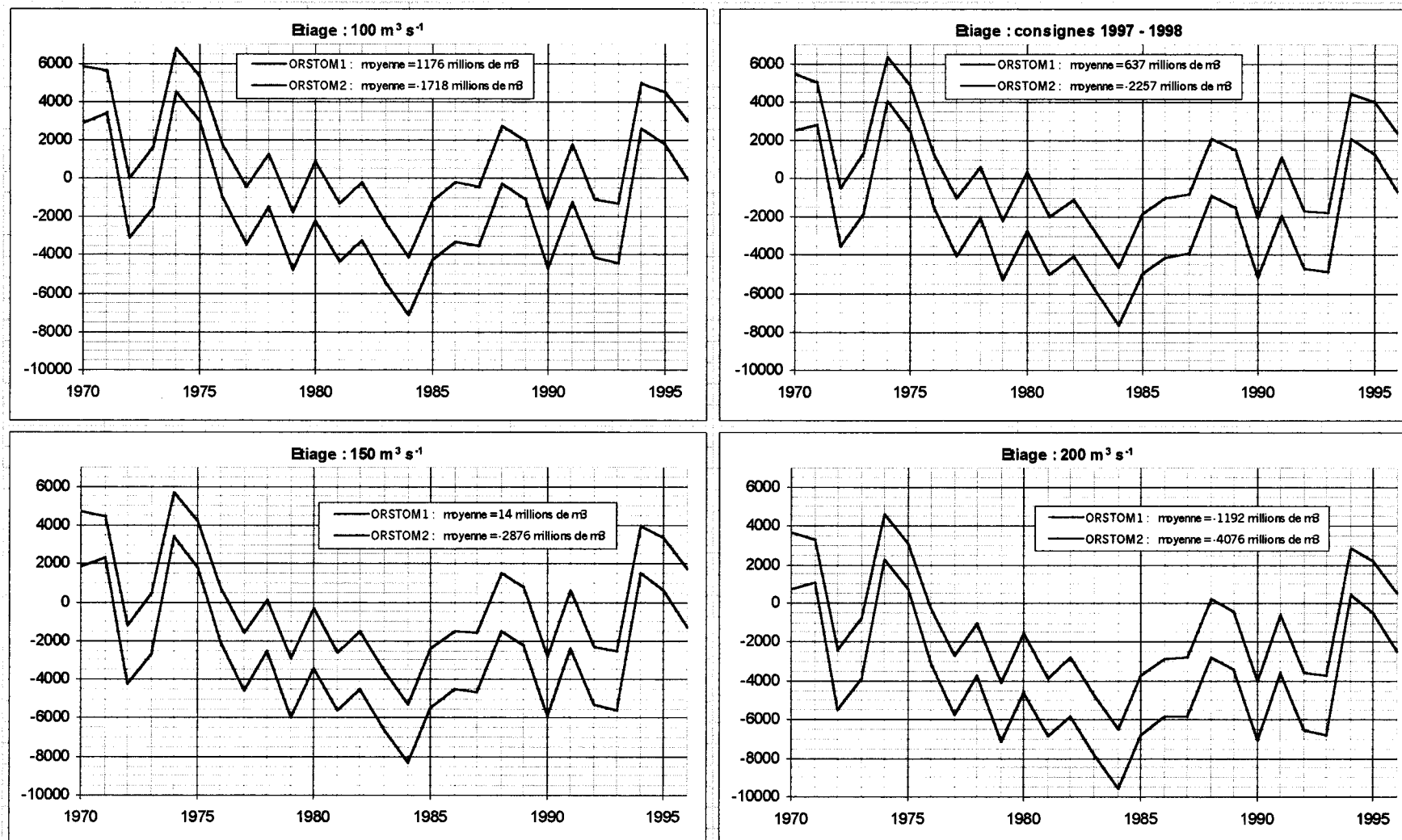


Figure 1: Evolution du stockage net annuel dans la retenue de Manantali (millions de mètres cube) sur la période du 20 août de l'année indiquée au 19 août de l'année suivante. Résultats obtenus par simulation numérique au pas de temps journalier (logiciel SIMULSEN), avec réalisation systématique d'un soutien de crue (hydrogrammes ORSTOM1 ou ORSTOM2) suivi d'un soutien d'étiage (100; 150; 200 m³ s⁻¹, ou débits demandés après la crue de 1997).

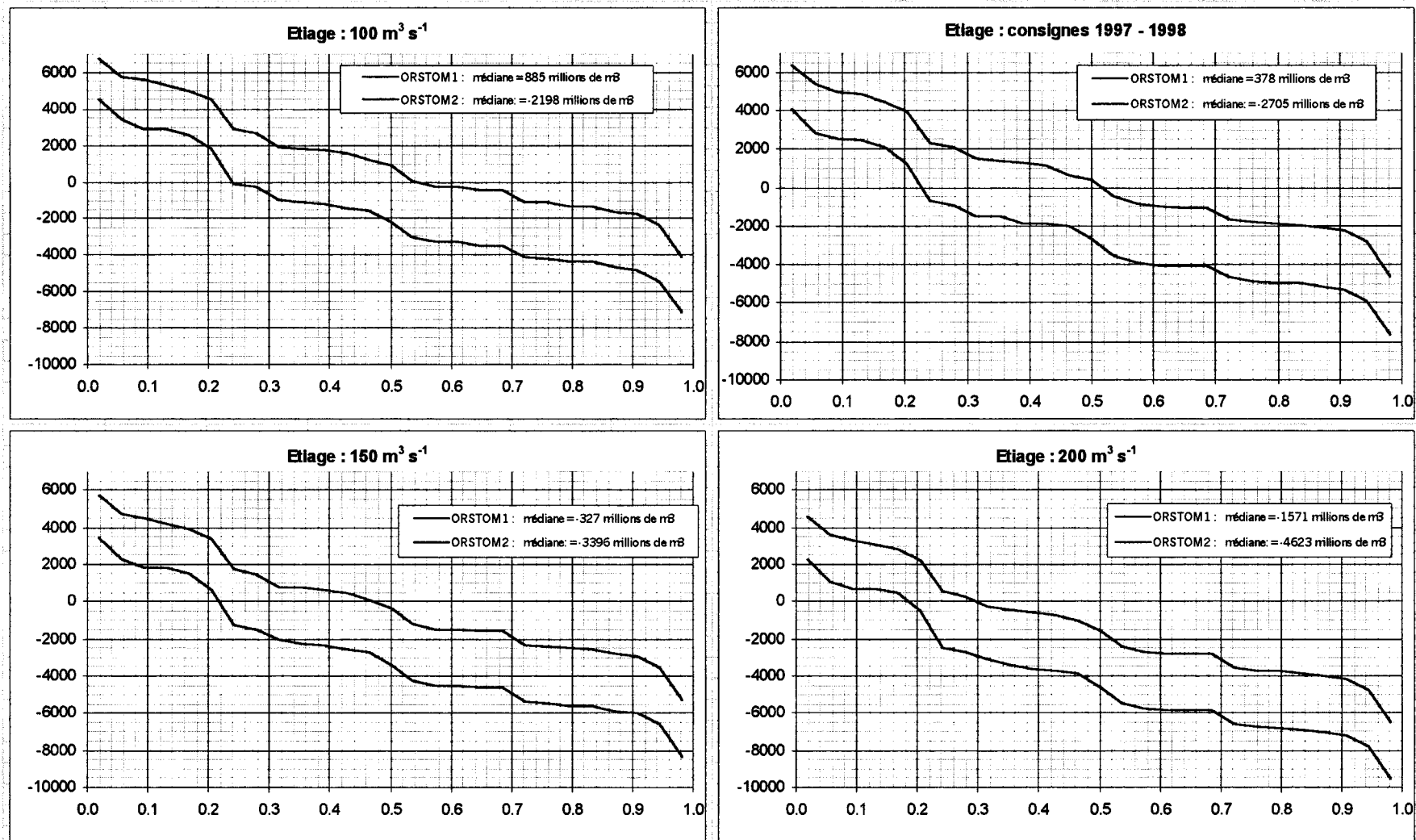


Figure 2: Stockage net annuel dans la retenue de Manantali (millions de mètres cube) sur la période du 20 août au 19 août de l'année suivante. Probabilité au dépassement évaluée entre le 20/8/70 et le 19/8/97. Résultats obtenus par simulation numérique au pas de temps journalier (logiciel SIMULSEN), avec réalisation systématique d'un soutien de crue (hydrogrammes ORSTOM1 ou ORSTOM2) suivi d'un soutien d'étiage (100; 150; 200 m³ s⁻¹, ou débits demandés après la crue de 1997).

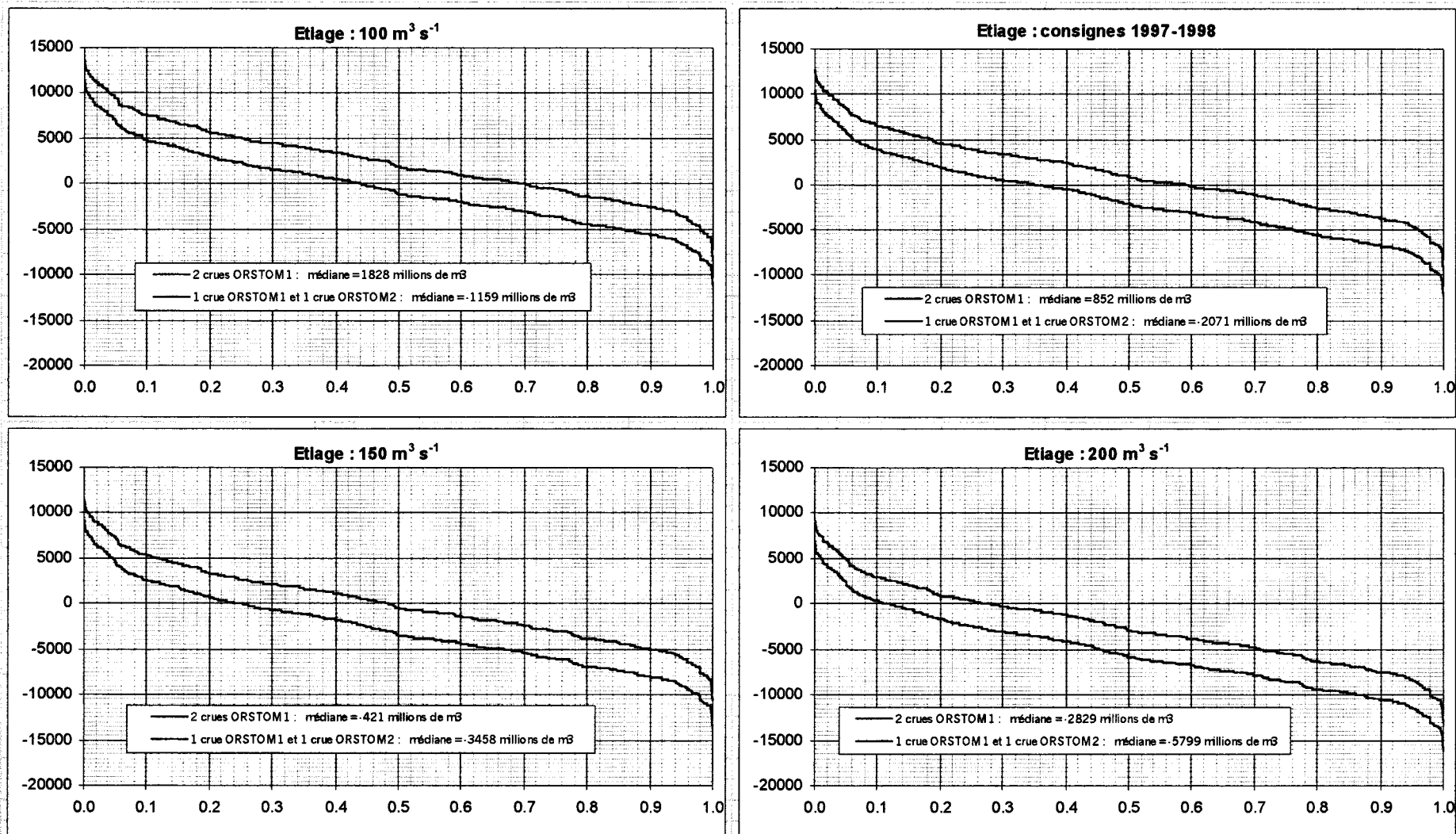


Figure 3: Stockage net bisannuel dans la retenue de Manantali (millions de mètres cube) sur la période du 20 août au 19 août de la deuxième année suivante. Probabilité au dépassement évaluée entre le 20/8/70 et le 19/8/97, par combinaison des valeurs de stockage net annuel obtenues par simulation numérique au pas de temps journalier (logiciel SIMULSEN). Cas envisagés: soutien de crue (hydrogramme ORSTOM1 tous les ans, ou bien alterné une année sur deux avec l'hydrogramme ORSTOM2) suivi d'un soutien d'étiage (100; 150; 200 m³ s⁻¹, ou débits demandés après la crue de 1997).

Programmation du soutien de crue de 1998 sur le fleuve Sénégal. ADDENDUM

ORSTOM 18/8/98

Choix de l'hydrogramme de crue

En plus des hydrogrammes ORSTOM1 et ORSTOM2, un hydrogramme intermédiaire ORSTOM3 a été considéré. Il est décrit ci-dessous :

Hydrogramme ORSTOM3 : 0 m³ s⁻¹ le 22 août ; 3000 m³ s⁻¹ le 30 août ; 3000 m³ s⁻¹ le 4 septembre ; 0 m³ s⁻¹ le 17 octobre.

Les hypothèses suivantes ont été envisagées pour le soutien de débit à réaliser d'ici le 31 décembre 2000, date pour laquelle on souhaite obtenir une retenue pleine(cote 208,05 m ; volume 11301 millions de m³) :

- Soutien d'étiage : conforme pour les trois années à venir, à la demande exprimée après la crue de 1997
- Soutien de crue : réalisé en 1998, avec un hydrogramme objectif de type ORSTOM1, ORSTOM2 ou ORSTOM3 ; non réalisé en 1999 ; non réalisé en 2000. Pour les années 1999 et 2000, le respect d'un débit sanitaire de 20 m³ s⁻¹ à la sortie du barrage est pris en compte à la place du soutien de crue.

Dans ces hypothèses, le stockage net probable dans la retenue entre le 20 août 1998 et le 31 décembre 2000 a été évalué sur la base de simulations effectuée sur la période 1970-2000. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 4. On constate qu'avec le soutien d'étiage envisagé, l'objectif de remplissage au 31/12/2000 pourra être réalisé avec les probabilités suivantes de réussite:

93 chances sur 100 si on réalise un soutien de crue ORSTOM1 en 1998

83 chances sur 100 si on réalise un soutien de crue ORSTOM3 en 1998

66 chances sur 100 si on réalise un soutien de crue ORSTOM2 en 1998

Avec un soutien de crue ORSTOM3 réalisé en 1998, on peut espérer obtenir dans la retenue au 31/12/2000, avec 90 chances sur 100, un volume au moins égal à 10338 millions de m³ (= 6894 + 3444) correspondant à la cote 205,91m.

Il semble nécessaire que le choix de l'hydrogramme à réaliser soit effectué, au vu des indications fournies ci-dessus, en fonction du niveau de risque accepté pour la non réalisation de l'objectif de remplissage.

Quel que soit l'hydrogramme retenu pour 1998, une analyse similaire devra être menée dans un an pour évaluer la possibilité d'effectuer un soutien de crue en 1999.

Résultats numériques communiqués oralement par l'ORSTOM lors de la réunion du 18/8/98

A la fin du paragraphe intitulé "analyse statistique du stockage net annuel dans la retenue" :

Le volume disponible au 20/8/98 (6894 millions de m³) permet d'espérer un volume au moins égal à 7779 millions de m³ (cote 200,17m) au 19/8/99 avec une chance sur deux, si l'on réalise cette année un soutien de crue ORSTOM1 suivi d'un soutien d'étiage à 100 m³ s⁻¹.

Au milieu du paragraphe intitulé "analyse statistique du stockage bisannuel dans la retenue", juste avant "Remarque" :

Le volume disponible au 20/8/98 (6894 millions de m³) permet d'espérer un volume au moins égal à 8722 m³ (cote 202,29) au 19/8/2000 avec une chance sur deux, si l'on réalise en 1998 et en 1999 un soutien de crue ORSTOM1 suivi d'un soutien d'étiage à 100 m³ s⁻¹. Si ce même soutien de débit est également réalisé en 2000, on peut espérer obtenir un volume au moins égal à 10502 millions de m³ (cote 206,28) au 31/12/2000, avec une chance sur deux.

Tableau 5 bis, relatif au stockage net entre le 20 août de l'année i et le 31 décembre de l'année i+2 : les valeurs suivantes sont obtenues dans l'hypothèse du soutien de crue ORSTOM1 réalisé chaque année, combiné à un soutien d'étiage de 100 m³ s⁻¹, pour les mêmes temps de retour que ceux du tableau 5 : 10130 ; 7853 ; 5776 ; 3608 ; 1520 ; -410 ; -2222.

Tableau 6 bis, relatif au productible énergétique obtenu dans le cas d'un soutien de crue ORSTOM1 à date fixe, suivi d'un soutien d'étiage à 100 m³ s⁻¹. Période simulée : 1970-1997. La différence avec le tableau 6 vient du fait qu'on envisage ici, en cas de non soutien de crue, de stocker les apports du Bafing dans la retenue plutôt que de laisser passer la crue naturelle.

Pour un seuil de 190 m on obtient : 61,6 MW ; 539,5 GWH ; années non soutenues : 80 82 84 85 87 91 93 ; fréquence du soutien = 0,75 ;

Pour un seuil de 192 m on obtient : 71,8 MW ; 629 GWH ; années non soutenues : 78 79 81 82 83 84 85 86 87 89 91 93 94 ; fréquence du soutien = 0,54 ;

Tableau 6 ter : mêmes hypothèses que dans le tableau 6, mais les simulations sont faites cette fois sur la période 1950-1997.

Pour un seuil de 190 m on obtient : 84,7 MW ; 742 GWH ; années non soutenues : 80 82 84 85 87 91 93 ; fréquence du soutien = 0,85 ;

Pour un seuil de 192 m on obtient : 90,6 MW ; 794 GWH ; années non soutenues : 78 79 81 82 83 84 85 86 87 89 91 93 94 ; fréquence du soutien = 0,73 ;

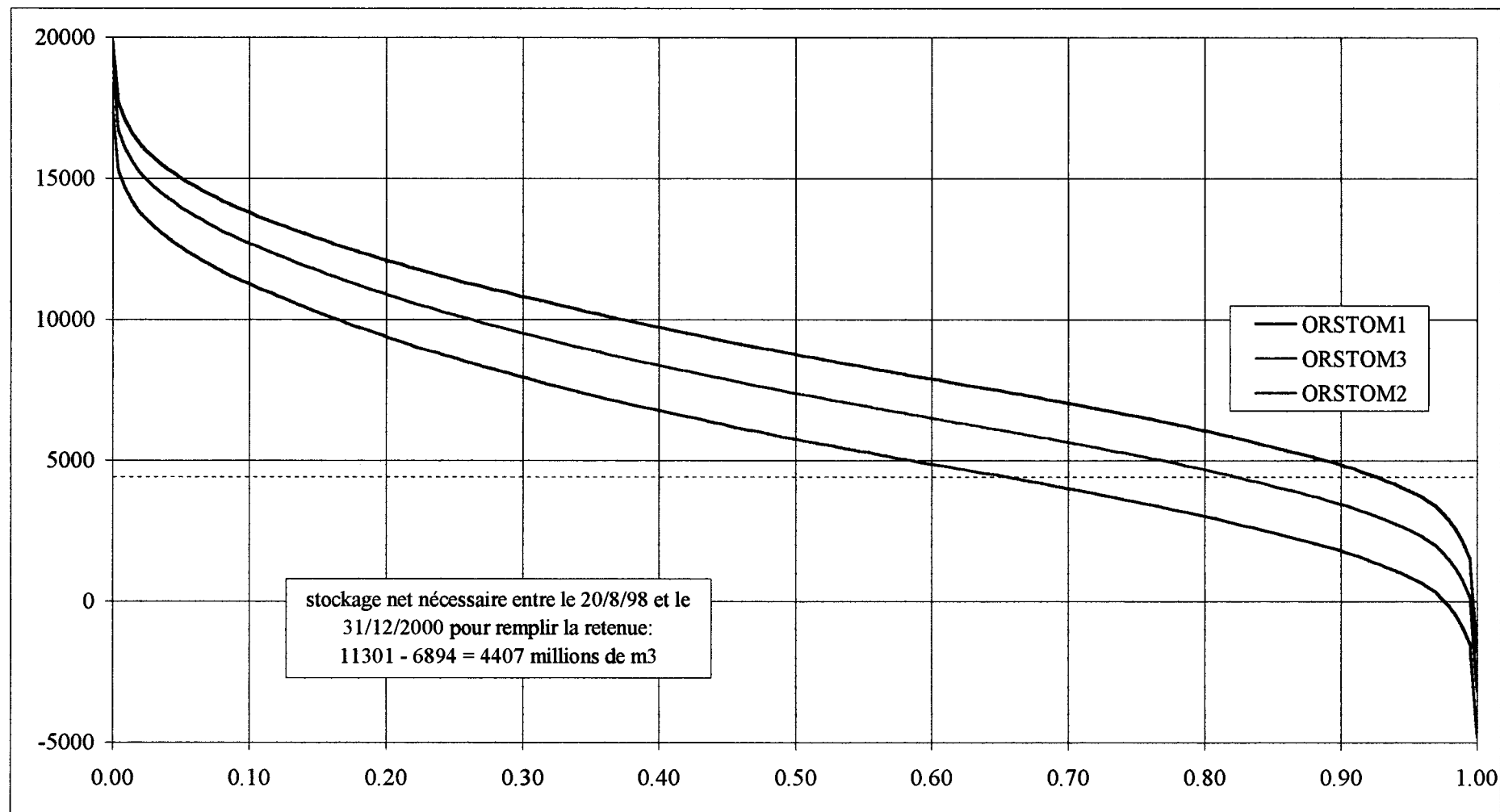


figure 4 : stockage net dans la retenue (millions de mètre cube) entre le 20 août de l'année i et le 31 décembre de l'année i+2. Probabilité au dépassement évaluée sur la période 1970-1997. Cas envisagé : soutien d'étiage conforme à la demande 1997-1998, associé à un soutien de crue réalisé pour l'année i et non réalisé pour les années i+1 et i+2.

ANNEXE 2

Ebauche d'un manuel de gestion du barrage de Manantali

Objet de cette note

Lors de la réunion du comité de suivi du projet "Etude de la gestion des réservoirs de l'OMVS", qui s'est tenue à Dakar le 22/6/98, l'ORSTOM a été chargé de préparer pour début août 1998 une ébauche du manuel de gestion du barrage de Manantali. Le document demandé, tout à fait provisoire, doit présenter le canevas de ce que pourrait être le manuel de gestion définitif. Ce dernier sera rédigé ultérieurement en tenant compte des critiques suscitées par l'ébauche présentée dans cette note, et des résultats acquis d'ici le terme du projet.

Principe de la gestion proposée pour le barrage de Manantali

La gestion du barrage sera considérée ici comme l'ensemble des opérations qui aboutissent, en temps réel et au pas de temps journalier, à la détermination du débit lâché par l'ouvrage à travers ses différents organes d'évacuation. Cette détermination repose sur la prise en compte de contraintes de gestion liées aux caractéristiques de l'ouvrage et de la retenue, et de consignes de gestion visant à satisfaire certains objectifs : fourniture d'eau à l'aval, laminage de crues, production électrique. Combinées à la situation hydrologique du moment, ces contraintes et consignes aboutissent chacune à la détermination de valeurs limites minimales Q_{min} à dépasser, ou de valeurs limites maximales Q_{max} à ne pas dépasser, pour le débit total lâché du barrage.

Les objectifs multiples de l'ouvrage peuvent se montrer concurrentiels dans certaines situations hydrologiques, en particulier lors de longues périodes de sécheresse comme celle qui perdure depuis les années 70. Il est donc indispensable qu'un ordre de priorité soit défini pour les consignes prises en compte, par l'Autorité compétente en la matière.

La détermination du débit total à lâcher du barrage se fait en prenant en compte les différentes valeurs limites Q_{min} et Q_{max} définies plus haut, en commençant par celles qui découlent des contraintes de gestion. Celles qui sont liées aux consignes de gestion sont ensuite utilisées par ordre de priorité décroissante des consignes.

La prise en compte successive des différentes valeurs limites Q_{min} et Q_{max} se traduit par le resserrement d'une fourchette dans laquelle le débit total lâché doit forcément se situer. Le processus s'arrête lorsque toutes les consignes envisagées ont vu leurs valeurs limites de débit à lâcher prises en compte, ou lorsque l'une d'entre elles s'avère incompatible avec les consignes de priorité supérieure. Dans ce dernier cas, la fourchette de débit à lâcher est réduite à une valeur unique, à la fois compatible avec les consignes de priorité supérieure prises en compte, et la plus proche possible du débit demandé par la première consigne incompatible.

Le débit total à lâcher du barrage doit être pris égal à la valeur minimale de la fourchette de valeurs déterminée ci-dessus, afin de respecter les consignes tout en préservant au mieux le volume d'eau emmagasiné dans la retenue.

Arrivé à ce point, le principe d'une bonne gestion consiste à produire le maximum d'énergie possible, en fonction du débit total à lâcher du barrage et de la cote dans le lac.

Les différents principes présentés ci-dessus vont maintenant être développés. Sauf mention contraire, ils sont tous intégrés dans la version actuelle du logiciel Simulsen, qui permet de simuler le fonctionnement de Manantali au pas de temps journalier.

Limites Q_{min} et Q_{max} de débit total à lâcher, liées aux contraintes de gestion

Contraintes liées aux caractéristiques de l'ouvrage.

Les organes d'évacuation de l'ouvrage sont les vannes de vidange de fond, l'évacuateur de crue et les différentes turbines. Les caractéristiques de chacun de ces organes permettent de déterminer pour toute cote dans le lac, le débit minimal (organe fermé, ou ouvert au minimum) et le débit maximal (à pleine ouverture) susceptibles de le traverser. Sous forme de tableaux et d'abaques dans le manuel définitif, une correspondance sera donc présentée entre le niveau du lac et les débits minimaux et maximaux pouvant transiter à travers chaque type d'organe ainsi qu'à travers tout l'ensemble. Ceci donnera donc les valeurs limites Q_{min} et Q_{max} du débit total pouvant être lâché du barrage pour une cote donnée.

Remarque :

Pour le calcul des débits extrêmes pouvant transiter à travers chaque type d'ouvrage, l'ORSTOM dispose déjà des valeurs caractéristiques définitives des turbines. Pour l'évacuateur de crue et la vidange de fond, les valeurs actuellement disponibles concernent le débit maximal évacué. Elles sont tirées du rapport suivant :

Etude d'exécution du barrage de Manantali - Rapport final - Projet définitif du génie civil - volume 1 : mémoire descriptif - Groupement Manantali - Dortmund, Bruxelles, Dakar. 1979.

En ce qui concerne le débit minimal évacué par l'évacuateur de crue, l'ORSTOM a fait une évaluation par formule d'hydraulique en tenant compte des dimensions des vannes secteur. Les résultats de ce calcul figurent dans le rapport suivant :

Simulsen. Logiciel de simulation de gestion de la retenue de Manantali au pas de temps journalier. Notice d'utilisation. J.C. Bader. ORSTOM Dakar 1991.

Il conviendra donc de vérifier auprès de l'OMVS s'il n'existe pas de donnée supplémentaire concernant l'évacuateur de crue, permettant de préciser la valeur limite Q_{min} de ce dernier en fonction de la cote.

Contraintes liées aux caractéristiques de la retenue

La cote limite de sécurité à ne pas dépasser dans la retenue est établie à 210,50 m. En fonction de la prévision des apports dans la retenue pour les 24 heures à venir, il est donc possible de définir une valeur limite Q_{min} de débit total à lâcher, permettant de ne pas dépasser la cote limite maximale dans 24 heures. Le calcul fait intervenir la relation hauteur-volume caractéristique de la retenue, ainsi que, par éventuel souci de précision, une prévision des pertes par évaporation en 24 heures.

Cette valeur Q_{min} liée à la cote de sécurité dans la retenue n'est différente de zéro que dans le cas exceptionnel d'une cote très élevée dans la retenue, coïncidant avec une prévision d'apports très élevée.

Le manuel définitif présentera sous forme de tableaux et d'abaques, la correspondance entre débit prévu pour les apports (moins les pertes) dans la retenue, et débit minimal Q_{min} à évacuer, en fonction de différentes cotes élevées dans la retenue.

Limites Q_{min} et Q_{max} de débit total à lâcher, liées aux consignes de gestion.

Consignes visant à satisfaire une demande d'eau exprimée à l'aval de l'ouvrage

Parmi ces consignes figurent toutes celles concernant le soutien de crue (cultures de décrue, impact écologique), le soutien d'étiage (cultures irriguées, navigation, consommations diverses, débit sanitaire réservé) et la compensation des pertes par évaporation accompagnant le transit des débits.

L'Autorité compétente devra définir pour chaque type de besoin un hydrogramme annuel minimal nécessaire à garantir au niveau de Bakel. Pour les débits destinés aux cultures irriguées et à la navigation, la fréquence de pénurie d'eau acceptable devra également être précisée. Pour le soutien de crue, les règles concernant les conditions de son déclenchement (en cours d'étude actuellement) devront être connues.

La fourniture d'eau visant à satisfaire une demande exprimée à l'aval doit répondre à deux préoccupations, qui aboutissent respectivement à la détermination d'une limite minimale Q_{min} et d'une limite maximale Q_{max} pour le débit total à lâcher du barrage. Ces deux préoccupations sont les suivantes :

1 - Lâcher de l'eau pour satisfaire la demande dans l'immédiat.

Cette préoccupation consiste à lâcher un débit suffisant dont la propagation, associée à celle des débits passant à Oualia sur le Bakoye et à Gourbassy sur la Falémé, permettra d'obtenir quelques jours plus tard à Bakel un débit au moins égal à celui défini par l'hydrogramme objectif. On détermine donc ici une valeur limite minimale Q_{min} pour le débit total à lâcher du barrage.

Le calcul de Q_{min} doit être fait chaque jour de façon automatique avec le logiciel Progeman, à partir des données de débit connues et prévues aux stations de Oualia et Gourbassy, et de l'hydrogramme objectif visé pour Bakel. Le principe du calcul repose sur le modèle de propagation développé à l'ORSTOM par JP Lamagat. Calé sur les données du régime naturel, ce modèle calcule le débit passant à Kayes à partir de ceux passant à Oualia et Manantali, avec un temps de propagation dépendant de la somme de ces deux derniers. Le même processus est appliqué entre Kayes, Gourbassy et Bakel. Les dernières versions de Progeman et Simulsen intègrent une version du modèle évaluant de façon spécifique les apports intermédiaires entre les stations, pour tenir compte du régime artificiel des écoulements.

2 - Conservation d'un stock d'eau suffisant dans la retenue pour satisfaire la demande dans le futur

Cette préoccupation consiste à ne pas lâcher trop d'eau, afin de conserver au moins un stock en dessous duquel on s'exposerait à un certain risque d'échec pour la satisfaction future de la demande. Il s'agit donc de ne pas faire descendre le niveau du lac en dessous d'une cote limite minimale, variable dans l'année, et dépendant à la fois de l'hydrogramme de besoin à satisfaire et de la fréquence d'échec acceptée.

Les limnigrammes de cotes limites minimales à respecter dans le lac peuvent être établis avec le logiciel Simulsen, par une procédure dont le principe est présenté dans le document suivant :

Consignes de gestion du barrage de Manantali. Détermination des cotes limites à respecter dans la retenue. Revue Hydrologie continentale. 7,3-12. JC Bader, 1992.

Un exemple de ce type de limnigramme est présenté sur la figure 1. La version définitive du manuel de gestion en comportera plusieurs, correspondant à des demandes différentes.

Le respect d'une cote minimale dans le lac revient chaque jour à déterminer une limite maximale Q_{max} de débit total à lâcher, en fonction des apports prévus sur les 24 heures à venir. Le calcul fait intervenir la relation hauteur-volume caractéristique de la retenue, ainsi que, par éventuel souci de précision, une prévision des pertes par évaporation en 24 heures.

Consignes relatives au laminage des crues

Le barrage de Manantali permet d'envisager le laminage des fortes crues à la fois dans le Bafing et, de façon non intégrale, dans le Sénégal. A la station de référence de Bakel, le débit du Sénégal provient en effet en partie du Bakoye et de la Falémé, affluents non contrôlés dont la somme des débits journaliers simultanés montre quelques valeurs supérieures à 4500 et même 5000 $m^3 s^{-1}$ dans la série historique. Hormis ces quelques pointes qui ne peuvent être évitées même en annulant complètement le débit du Bafing, le barrage de Manantali peut assurer un laminage conséquent des fortes crues du Sénégal. Même en période actuelle d'années sèches, le laminage doit faire partie des consignes prioritaires prises en compte dans la gestion du barrage, en tant que mesure de sécurité visant à protéger les vies humaines et les aménagements en bordure du fleuve.

L'Autorité compétente devra définir pour le laminage dans le Bafing, le débit maximal à ne pas dépasser à la sortie du barrage, ainsi que la fréquence acceptée pour les dépassements. Pour le laminage dans le Sénégal, elle devra également définir un débit maximal à ne pas dépasser, ainsi que la fréquence acceptée pour les dépassements évitables, les dépassements inévitables dus aux seuls débits du Bakoye et de la Falémé ne pouvant être pris en compte.

De la même façon que pour la fourniture d'eau visant à satisfaire une demande exprimée à l'aval du barrage, le laminage doit répondre à deux préoccupations, qui aboutissent respectivement à la détermination d'une limite maximale Q_{max} et d'une limite minimale Q_{min} pour le débit total à lâcher du barrage. Ces deux préoccupations sont les suivantes :

1 – Ne pas lâcher trop d'eau afin d'assurer le laminage des débits dans l'immédiat.

Pour le laminage dans le Bafing, cette préoccupation consiste à ne pas lâcher plus que la limite définie par l'Autorité compétente.

Pour le laminage dans le Sénégal, la limite maximale Q_{max} à ne pas dépasser correspond au débit dont la propagation, associée à celle des débits passant à Oualia sur le Bakoye et à Gourbassy sur la Falémé, permettrait d'obtenir quelques jours plus tard à Bakel un débit égal à la limite définie par l'Autorité. Le calcul de Q_{max} doit être fait chaque jour de façon automatique avec le logiciel Progeman, à partir des données de débit connues et prévues aux stations de Oualia et Gourbassy, et de la valeur de débit maximal admis pour Bakel.

2 – Conservation d'une revanche suffisante dans la retenue, afin de garantir la possibilité de laminer les crues dans le futur

Cette préoccupation consiste à lâcher suffisamment d'eau, de façon à conserver libre une certaine capacité de stockage dans la retenue et de pouvoir ainsi amortir une éventuelle crue à venir. Il s'agit donc de ne pas faire monter le niveau du lac au dessus d'une cote limite maximale, variable dans l'année, et dépendant à la fois de la limite de débit à ne pas dépasser (à la sortie du barrage ou à Bakel) et de la fréquence d'échec acceptée.

Les limnigrammes de cotes limites maximales à respecter dans le lac peuvent être établis avec le logiciel Simulsen, par la procédure déjà mentionnée plus haut pour les limnigrammes de cotes minimales.

Un exemple de ce type de limnigramme est présenté sur la figure 2. La version définitive du manuel de gestion en comportera plusieurs, correspondant à des valeurs de laminage différentes pour la sortie du barrage et pour Bakel.

Le respect d'une cote maximale dans le lac revient chaque jour à déterminer une limite minimale Q_{min} de débit total à lâcher, en fonction des apports prévus sur les 24 heures à venir. Le calcul fait intervenir la relation hauteur-volume caractéristique de la retenue, ainsi que, par éventuel souci de précision, une prévision des pertes par évaporation en 24 heures.

Consignes concernant une demande de production électrique

Une grande variété de règles peut être envisagée, concernant les consignes de production électrique. Nous supposons a priori que sont définies, par une Autorité compétente, les deux variables suivantes :

P (MW) : puissance électrique demandée. On peut concevoir un plan de demande variable défini sur l'année, mais il peut s'agir également d'une demande ajustée en continu en fonction des besoins exprimés. Pour des raisons évidentes de productivité, on a intérêt à forcer la valeur de P jusqu'au maximum productible, à chaque fois que la cote du barrage se trouve au dessus de la cote de déversement (208,05m).

S (m) : seuil de turbinage. Si la cote du lac se situe au dessus de ce seuil, la demande de production électrique est prise en compte. Dans le cas contraire, on ne produit que ce qu'il est possible de produire en fonction, d'une part, de la cote du lac, et, d'autre part, du débit total à lâcher déterminé par les autres consignes. L'intérêt d'un tel seuil consiste à empêcher des lâchers d'eau effectués à seule fin de production électrique, dans les cas où celle-ci peut être jugée non rentable lorsqu'elle exige des débits turbinés très importants du fait d'une trop faible chute.

Lorsque le niveau du lac permet de produire une certaine puissance p , il est possible de déterminer une limite minimale q_{min} et une limite maximale q_{max} pour le débit total lâché du barrage permettant de réaliser cette production. La signification de q_{min} est évidente puisque ce débit correspond à la somme du débit minimal à turbiner pour produire p , et du débit minimal passant dans l'évacuateur de crue (nul en dessous de la cote 208,05m). L'existence de la limite q_{max} correspond au fait que le réhaussement de niveau dans le canal de fuite, provoqué par un fort débit lâché, entraîne une diminution de la chute nette disponible sur les turbines. La version définitive du manuel de gestion donnera sous forme de tableaux et d'abaques, les relations entre le niveau du lac et les limites de débit total lâché q_{min} et q_{max} permettant de produire la puissance p , pour différentes valeurs de cette dernière. On envisagera les cas où le nombre de turbines exploitables est de 4 ou 5. Les relations seront établies de façon théorique à partir des éléments disponibles concernant les caractéristiques des turbines, la relation hauteur-débit dans le canal de fuite et, si possible, les pertes de charges dans les conduites d'amenée de débit aux turbines.

Partant de ces principes, différentes possibilités sont envisageables pour la détermination des limites Q_{min} et Q_{max} relatives aux consignes de production électrique, prises en compte lorsque le niveau du lac est supérieur au seuil de turbinage.

1. Détermination de Q_{min}

Si le niveau du lac permet de produire la puissance P , alors Q_{min} est égal à la valeur q_{min} définie plus haut, et relative à la puissance P . Dans le cas inverse, il y a plusieurs possibilités, parmi lesquelles l'Autorité compétente devra choisir. On peut déjà proposer les deux solutions suivantes :

- Non prise en compte de la demande de production électrique : $Q_{min} = 0$
- Demande de production du maximum productible P_m ($< P$) pour la cote observée dans le lac. Q_{min} est alors égal dans ce cas à la valeur q_{min} relative à P_m .

2. Détermination de Q_{max}

Là encore il y a plusieurs possibilités parmi lesquelles il faudra choisir. On peut citer les solutions suivantes :

- Absence de détermination de Q_{max} : cette solution consiste à ne barrer aucunement les demandes de débit relatives à des consignes de moindre priorité.
- $Q_{max} = q_{max}$ (relatif à P ou à Pm si P ne peut être produit). Cette solution autorise les consignes de moindre priorité à demander plus d'eau que nécessaire pour la production électrique à réaliser. Elle les empêche cependant de demander un débit trop important qui, en faisant trop baisser la chute nette, empêcherait de réaliser la production envisagée.
- $Q_{max} = Q_{min}$. Cette solution favorise la production électrique par rapport aux consignes de moindre priorité, puisqu'elle empêche ces dernières de demander plus d'eau qu'il n'en faut pour réaliser la production envisagée.
- $Q_{max} = 0$ si la cote du lac se situe en dessous du seuil de turbinage S

3. Cas particulier de l'étiage

En cours d'étiage, le régime de tarissement établi sur le Bafing permet de faire une prévision de qualité acceptable sur les apports qui vont entrer dans la retenue jusqu'à la fin du mois de mai suivant. Ceci permet de déterminer chaque jour la valeur minimale au dessus de laquelle on doit conserver le niveau dans le lac, si l'on veut garantir la possibilité de satisfaire un certain programme de demande électrique jusqu'à la fin du mois de mai suivant, avec une cote supérieure au seuil de turbinage. La procédure permettant de faire ce calcul, intégrée dans Simulsen, devra être programmée pour pouvoir être utilisée en temps réel.

Le niveau minimal à respecter dans le lac, ainsi déterminé, permet de définir une valeur maximale Q_{max} de débit total à lâcher du barrage, selon le principe déjà cité plusieurs fois dans cette note. Là encore, on a la possibilité de prendre en compte –ou non- cette limite Q_{max} .

Calcul du débit total à lâcher par combinaison des limites Q_{min} et Q_{max}

Chaque jour, après avoir calculé les limites Q_{min} et Q_{max} relatives aux différentes contraintes et consignes de gestion, la fourchette envisageable pour le débit total à lâcher du barrage sera déterminée de la façon suivante :

On note Q1 et Q2 les limites minimales et maximales de cette fourchette.

Le calcul est initialisé en prenant : $Q1=0$ et $Q2=+\infty$

Ensuite, les différentes valeurs de Q_{min} et Q_{max} sont prises en compte, en commençant par celles qui concernent les contraintes de gestion liées aux caractéristiques de l'ouvrage et à celles de la retenue. Viennent ensuite celles qui ont été déterminées pour les différentes consignes de gestion, prises par priorité décroissante. Etant donnés Q1 et Q2, la prise en compte d'une limite Q_{min} ou Q_{max} se fait toujours selon le principe suivant :

1 - Pour une limite minimale Q_{min} :

- si $Q_{min} < Q1$ alors Q_{min} n'a aucun effet sur Q1 et Q2
- si $Q1 < Q_{min} < Q2$ alors on adopte Q_{min} comme nouvelle valeur de Q1

- si $Q2 < Qmin$ alors on adopte $Q2$ comme nouvelle valeur de $Q1$, et les limites $Qmin$ et $Qmax$ déterminées à partir des consignes de priorité moindre ne sont pas prises en compte

2 – Pour une limite maximale $Qmax$:

- si $Qmax > Q2$ alors $Qmax$ n'a aucun effet sur $Q1$ et $Q2$
- si $Q1 < Qmax < Q2$ alors on adopte $Qmax$ comme nouvelle valeur de $Q2$
- si $Qmax < Q1$ alors on adopte $Q1$ comme nouvelle valeur de $Q2$, et les limites $Qmin$ et $Qmax$ déterminées à partir des consignes de priorité moindre ne sont pas prises en compte.

Le processus de resserrement de la fourchette $Q1 - Q2$ s'arrête lorsque toutes les consignes ont été prises en considération, ou dès lors que $Q1 = Q2$. Le débit total à lâcher du barrage doit dans tous les cas être pris égal à $Q1$.

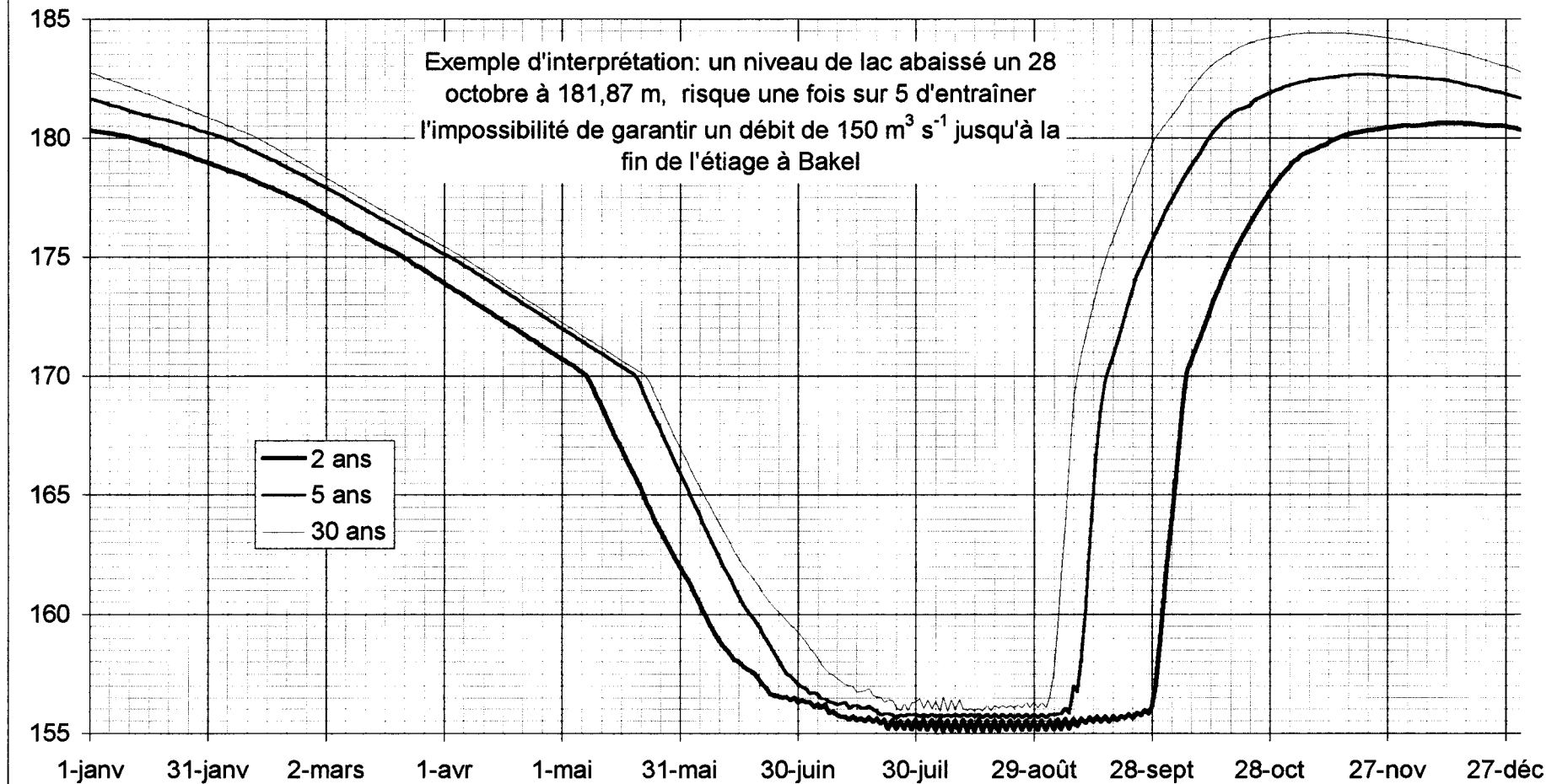
Calcul du débit à faire passer dans les différents organes du barrage.

La version définitive du manuel de gestion fournira des tableaux et abaques permettant de connaître la puissance maximale productible et le débit turbiné associé, en fonction du débit total lâché du barrage et de la cote dans le lac. Il restera alors au gestionnaire de l'ouvrage à régler le débit passant par les vannes de fond et éventuellement par le déversoir de crue, pour laisser passer à travers ces organes la différence entre débit total à lâcher et débit turbiné.

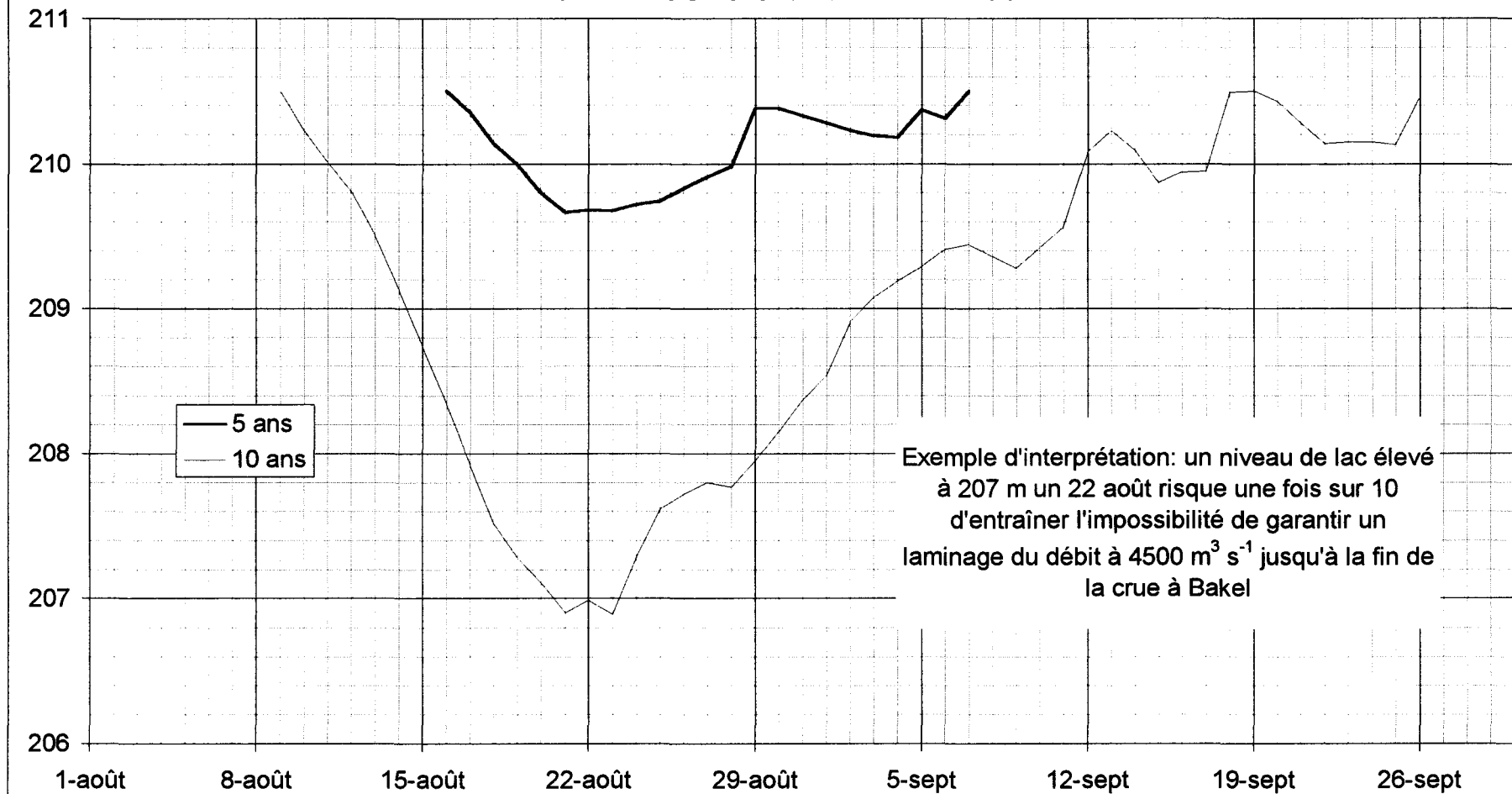
Simulations de gestion

Le manuel de gestion définitif présentera de façon détaillée les résultats de simulations menées pour quelques cas de gestion types, envisageant plusieurs ordres de priorité pour les différentes consignes.

**figure 1: cote limite minimale à respecter dans le lac, relative au stock
nécessaire pour garantir un débit minimum de $150 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ à Bakel. Période de
référence: 1950-1997**



**figure 2: cote limite maximale à respecter dans le lac, relative à la revanche
nécessaire permettant de laminier le débit du sénégál à Bakel à $4500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.
Période de référence: 1950-1997**



ANNEXE 3

Note sur l'éventuelle impossibilité de faire une prévision de débit à 10 jours sur le Bakoye et la Falémé. Conséquences prévisibles sur le productible énergétique du barrage de Manantali.

Résumé

Il est envisagé de réaliser, à partir du barrage de Manantali, un soutien de crue à date mobile sur le fleuve Sénégal. Avec certaines règles visant à déterminer la date du soutien, et moyennant une prévision de débit à l'horizon 10 jours sur les stations de Oualia et Gourbassy, ce type de gestion permettrait de soutenir la crue en dépensant un minimum d'eau à partir du barrage, pour les deux raisons suivantes :

- le soutien de crue serait effectué de façon à faire coïncider l'hydrogramme objectif avec une pointe importante de débit sur les affluents non contrôlés, Bakoye et Falémé.
- Pour les années où le soutien de crue nécessiterait le plus de lâchés à partir du barrage, le soutien de crue ne serait pas effectué.

Actuellement, la mise en place d'un tel soutien de crue à date mobile est bloquée par les difficultés rencontrées dans le calage des modèles hydro-pluviométriques permettant de prévoir les débits à Oualia et Gourbassy. On espère pouvoir conclure d'ici la fin de l'année 1998, sur la possibilité de caler de tels modèles à partir des seules données hydrométriques et pluviométriques actuellement disponibles et exploitables.

Dans le cas où le soutien de crue à date mobile ne pourrait pas être mis en pratique, le soutien de crue à date fixe sera retenu. Il doit être calé sur une date optimale nécessitant les plus faibles débits lâchés possible à partir du barrage. Pour un hydrogramme ORSTOM1, considéré comme objectif de crue à réaliser à Bakel, la date optimale du premier jour de palier ($2500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) se situe le 28 août sur la période 1973-1997. C'est pour cette date que les volumes lâchés dans la tranche des débits supérieurs à $600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (jamais turbinables) sont les plus faibles.

Le rapport de synthèse de première phase du POGR mentionne le résultat suivant : un soutien de crue à date fixe optimale, réalisé tous les ans de façon systématique, entraîne une baisse importante de production électrique moyenne par rapport au soutien de crue à date mobile (passage de 46,1 à 29,7 MW). Le soutien à date fixe optimale doit donc être envisagé de façon non systématique, avec la possibilité de ne pas être effectué certaines années. Ceci permet de reconstituer le stock dans le lac de Manantali, quand celui-ci est descendu trop bas.

Pour tester l'efficacité d'un soutien de crue réalisé à date fixe de façon non systématique, une simulation numérique a été menée sur la période 1970-1997 avec les consignes de gestion suivantes:

- respect d'un débits réservé de $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ à la sortie du barrage et à Bakel

- fourniture d'eau pour l'irrigation de 100.000 ha de culture, augmentée de $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, et préservation d'un stock suffisant pour garantir la possibilité de presque toujours satisfaire cette demande.
- production de 90 MW d'électricité quand le niveau du lac dépasse un seuil de turbinage noté S_{turb}
- soutien de crue pour réaliser un hydrogramme de type "ORSTOM1" à Bakel, avec le premier jour de palier ($2500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) fixé au 28 août. Le soutien de crue n'est déclenché que pour les années présentant dans le lac au 20 août, une cote supérieure à un seuil de soutien S_{sout} .

Les résultats obtenus montrent qu'une valeur élevée est souhaitable pour le seuil de turbinage S_{turb} , tant pour l'énergie moyenne produite que pour la fréquence de crues correctement soutenues. Pour la plus forte valeur testée de S_{turb} , soit 190 m, il apparaît qu'un abaissement du seuil de soutien S_{sout} s'accompagne d'une perte de puissance produite et d'une fréquence plus élevée de bonnes crues. Ainsi, pour un seuil de soutien S_{sout} fixé à 190 et 182 m respectivement, on obtient des puissances moyennes produites de 58,7 et 44,7 MW, et des fréquences de bonnes crues égales à 0,64 et 0,86. Les valeurs de S_{sout} situées entre 190 et 182 m donnent des résultats intermédiaires. Pour situer la qualité des résultats obtenus, on rappelle que la fréquence des bonnes crues s'élève à 0,61 en régime naturel. Il est probable que des valeurs de seuil de turbinage S_{turb} supérieures à 190 m donneraient des résultats intéressants. Ceci reste pour le moment à tester.

Conclusion : un soutien de crue réalisé à date fixe optimale peut être envisagé moyennant peu de perte de production électrique, comparé au soutien de crue à date mobile. Ceci est possible à condition de réaliser une gestion assurant un niveau globalement élevé dans la retenue. Pour cela, le soutien de crue ne doit être déclenché que si la réserve disponible au début du soutien est suffisante (niveau au 20 août supérieur à un seuil de soutien S_{sout}). La demande de production électrique ne doit par ailleurs être prise en compte que lorsque le niveau du lac dépasse un seuil de turbinage S_{turb} suffisamment élevé. Quand cette dernière demande n'est pas prise en compte, on se contente de turbiner la part maximale turbinable du débit lâché, celui-ci étant déterminé à partir des autres consignes de gestion.

1. *Stade actuel des études concernant la prévision de débit sur le Bakoye et la Falémé*

Dans le cadre de l'étude intitulée Programme d'Optimisation de la Gestion des Réservoirs, la mise au point d'un modèle pluie-débit sur les rivières Bakoye et Falémé ne peut être envisagée que sur la base des données de pluie et de débit déjà existantes sur les régions concernées.

Les différentes tentatives de calage de modèle effectuées jusqu'à présent n'ont pas donné de résultat satisfaisant. Les difficultés rencontrées viennent essentiellement de la pauvreté en données pluviométriques exploitables. Ceci est dû à la faible densité de postes pluviométriques sur la région, à la taille importante des bassins à l'exutoire desquels on désire faire une prévision, et à la qualité parfois insuffisante des données pluviométriques enregistrées.

Tous les tests envisageables n'ont pas encore été effectués, mais devraient l'être d'ici la fin de l'année 1998. On pourra alors dire à cette date s'il est possible ou non, sur la base des données existantes, de mettre au point un modèle pluie-débit permettant de faire une prévision à l'horizon 10 jours aux stations de Oualia et Gourbassy. Une réponse négative signifierait que la mise au point d'un tel modèle nécessite au minimum l'installation et le suivi sur plusieurs années, d'un certain nombre de postes pluviométriques supplémentaires.

2. *Soutien de crue systématique à date fixe ou soutien à date mobile. Différences sur le productible énergétique (& 2.1.1 du rapport de synthèse de première phase)*

La prévision des débits à l'horizon 10 jours est envisagée pour pouvoir mettre en œuvre un soutien de crue à date mobile. Le principe de cette gestion consiste à attendre que la somme des débits prévus à l'horizon 10 jours à Oualia et Gourbassy dépasse un certain seuil (décroissant dans l'année) et présente un maximum, pour déclencher le soutien de crue.

Les chiffres présentés dans le paragraphe 2.1.1 du rapport de synthèse de première phase, concernant le productible énergétique obtenu sur la période 1970-1993, avec les caractéristiques de turbines indiquées dans les études de Gibb, dans le cas d'une gestion basée sur les consignes suivantes :

- respect d'un débit réservé de $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ à la sortie du barrage et à Bakel
- laminage des pointes de crue à $4500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ à Bakel
- fourniture d'eau nécessaire pour l'irrigation de 100.000 ha de cultures (suivant les hypothèses des études de Gibb concernant ces besoins), augmentée de $30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pour la compensation des pertes et de $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pour la consommation humaine
- préservation d'un stock suffisant dans le lac, permettant de garantir le respect de la précédente consigne au moins 24 années sur 25.
- Production de 90 MW d'électricité (ou du maximum productible quand le barrage déverse) si le niveau du lac dépasse la cote 182 m, considérée comme seuil de turbinage. En dessous de ce seuil, cette consigne n'est pas prise en compte.
- soutien de crue visant à réaliser un hydrogramme de type "ORSTOM1" à Bakel.

Ces consignes, listées par ordre de priorité décroissante, sont à la base du calcul des débits totaux lâchés du barrage. On envisage qu'il est toujours turbiné la part maximale turbinable du débit lâché. Bien que les résultats présentés dans le paragraphe 2.1.1 concernent la période 1970-1993, ils sont obtenus par une simulation débutant au 1^{er} janvier 1904 avec une cote de 205 m dans le lac.

Pour le soutien de crue, deux hypothèses ont été envisagées : soutien de crue à date mobile, avec prévision du débit à l'horizon 10 jours sur le Bakoye et la Falémé ; soutien de crue systématique à date fixe optimale. Ces deux hypothèses aboutissent respectivement aux valeurs suivantes pour le productible énergétique moyen : 46,1 et 29,7 MW. Le productible nettement supérieur obtenu avec le soutien à date mobile s'explique par le fait que ce type de gestion s'effectue, globalement, avec un niveau de lac plus élevé que dans le cas du soutien systématique à date fixe. Ceci est dû aux deux raisons suivantes :

- En faisant coïncider autant que possible le soutien de crue avec une pointe importante de débit sur le Bakoye et la Falémé, on fait diminuer le volume total d'eau lâché du barrage ainsi que la partie non turbinable de ce volume. On verra plus bas que l'économie d'eau ainsi réalisée est relativement peu importante.
- Dans le soutien à date mobile, la date de déclenchement de celui-ci dépend du moment où la somme des débits prévus à l'horizon 10 jours à Oualia et Gourbassy dépasse un certain seuil, variable dans l'année. Le seuil envisagé dans le paragraphe 2.1.1 aboutit, du fait qu'il n'est jamais atteint ces années-là, à l'absence de soutien de crue pour les années 1983, 1984, 1987 et 1990 (fréquence de bonnes crues : 0,83). Il se trouve que ces années sont celles pour lesquelles le soutien de crue, même positionné à la meilleure date possible, aurait coûté le plus d'eau à lâcher du barrage. Le fait de ne pas faire le soutien de crue ces années-là évite non seulement une dépense d'eau importante mais permet aussi de reconstituer le stock dans le lac. Ceci est la raison principale du gain de production électrique occasionné par le soutien à date mobile par rapport au soutien à date fixe, lorsque ce dernier est effectué systématiquement chaque année.

3. Le soutien de crue à date fixe optimale. Coût en eau.

On a calculé, en première approximation, le volume total d'eau à lâcher du barrage pour réaliser un hydrogramme ORSTOM1. Ce volume total V , ainsi que la part VNT de volume correspondant aux tranches de débit lâché supérieur à $600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (dans tous les cas non turbinable) a été estimé pour chaque année de la période 1973-1997, en fonction de la date J_0 coïncidant avec le premier jour de palier à $2500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de l'hydrogramme objectif à Bakel.

La date J_0 donnant la plus petite valeur moyenne de $VNT(J_0)$ sur l'ensemble des années de 1973 à 1997 se situe le 28 août. La différence entre $VNT(28 \text{ août})$, volume lâché non turbinable occasionné par un soutien de crue calé sur le 28 août, et VNT_{opt} , la plus petite valeur de volume lâché non turbinable, obtenue avec un calage optimal de soutien de crue, se situe pour toutes les années de 1973 à 1997 en dessous de 500 millions de mètres cube :

$$VNT(28 \text{ août}) - VNT_{\text{opt}} < 500 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

Une fois sur deux, cette différence est en outre inférieure à 200 millions de mètres cube.

On voit donc que par rapport à un soutien de crue à date fixe optimale, calé sur le 28 août, un soutien de crue à date mobile optimale permet de faire diminuer la part de volume lâché non turbinable d'une valeur annuelle ne dépassant jamais 500 millions de mètres cube, et située une fois sur deux en dessous de 200 millions de mètres cube. On obtient un résultat similaire si l'on envisage, au lieu de VNT, le volume total lâché V avec une date fixe optimale située au 22 août. Le coût en eau d'un soutien de crue à date fixe optimale, par rapport à un soutien à date mobile, apparaît donc relativement peu important.

4. Soutien de crue à date fixe optimale, réalisé de façon non systématique en fonction du stock disponible dans le lac

4.1. Principe

D'après ce qui précède, il apparaît qu'un gain de production électrique important peut être réalisé en faisant un soutien de crue à date mobile plutôt qu'un soutien de crue systématique à date fixe optimale. Ce gain est essentiellement dû au fait que le soutien à date mobile aboutit certaines années (celles où les lâchers auraient été les plus importants), à l'absence de soutien de crue. Ceci permet une reconstitution du stock dans le lac, inexistante dans le cas d'un soutien systématique à date fixe.

Dans le cas où se confirmerait l'impossibilité de prévoir les débits à l'horizon 10 jours sur le Bakoye et la Falémé, il apparaît donc nécessaire d'envisager un soutien de crue à date fixe optimale qui ne sera pas réalisé de façon systématique chaque année, si l'on veut ne pas trop perdre sur le plan de la production d'électricité. Une première solution consiste à faire le soutien de crue suivant une périodicité fixée, qui offre l'avantage de savoir à l'avance pour quelles années le soutien sera réalisé. Suivant ce scénario, il est possible qu'un soutien de crue puisse être enclenché même si le stock dans le lac est très faible, ceci risquant alors d'aboutir à un épuisement de la réserve. Il paraît donc préférable d'envisager une seconde solution, qui consiste à déclencher le soutien de crue si, et seulement si, la réserve dans le lac dépasse au moment du déclenchement, un certain seuil fixé à l'avance. Plus ce seuil de soutien de crue sera bas, plus le soutien de crue sera déclenché fréquemment.

4.2. Simulations numériques

A l'aide du logiciel SIMULSEN, on a simulé la gestion de la retenue suivant les consignes suivantes, listées par ordre de priorité décroissante :

- respect d'un débit réservé de $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ à la sortie du barrage et à Bakel
- fourniture d'eau nécessaire pour l'irrigation de 100.000 ha de cultures (suivant les hypothèses des études de Gibb concernant ces besoins), augmentée de $30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pour la compensation des pertes et de $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pour la consommation humaine
- préservation d'un stock suffisant dans le lac, permettant de garantir le respect de la précédente consigne au moins 24 années sur 25 (statistiques établies sur la période 1970-1997).
- production de 90 MW d'électricité (ou du maximum productible quand le barrage déverse) si le niveau du lac dépasse un seuil de turbinage S_{turb} fixé à l'avance. En dessous de ce seuil, cette consigne n'est pas prise en compte.
- soutien de crue visant à réaliser à date fixe un hydrogramme de type "ORSTOM1" à Bakel. La règle adoptée pour le déclenchement annuel du soutien est la suivante : si la cote du lac dépasse au 20 août un seuil de soutien S_{sout} fixé à l'avance, alors le soutien de crue est réalisé de façon à caler sur le 28 août à Bakel, le premier jour de palier de débit à $2500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Dans le cas contraire, cette consigne n'est plus prise en compte jusqu'à la fin de l'année, et le soutien de crue n'est pas réalisé.

Les simulations ont été menées sur la période 1970-1997, la cote initiale du lac étant fixée à la limite de débordement (208,05m le 1^{er} janvier 1970). On envisage qu'il est toujours turbiné la part maximale turbinable du débit lâché. Les résultats obtenus suivant différentes valeurs de seuil de turbinage S_{turb} (182, 185 et 190 m) et de seuil de soutien de crue S_{sout} (entre 176 et 194 m) sont donnés dans les tableaux 1 à 3.

4.3. Résultats obtenus

4.3.1. Critère de bonne crue

La règle adoptée pour le déclenchement du soutien de crue, aboutit certaines années à l'absence de soutien. Pour l'ensemble des scénarios simulés, ces années sans soutien (répertoriées dans les tableaux 1 à 3) aboutissent, hormis l'année 1988, à un hydrogramme situé très largement en dessous de l'hydrogramme ORSTOM1, et sans aucune efficacité pour les cultures de décrue. Par ailleurs, la règle concernant la préservation de stock pour l'irrigation peut entraîner dans certains cas un arrêt du soutien avant terme, bien que celui-ci ait été déclenché. Dans les tableaux 1 à 3, on a répertorié les années pour lesquelles un soutien de crue a été réalisé de façon très incomplète. On considère qu'un soutien de crue a été réalisé de façon satisfaisante si l'hydrogramme obtenu à Bakel est bien supérieur ou égal à l'hydrogramme ORSTOM1 pendant la montée, le palier, et la partie de la descente concernant les débits supérieurs à $1300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

4.3.2. Crues obtenues en régime naturel

En ce qui concerne la qualité des crues obtenues pour les différents scénarios simulés, nous prendrons le régime naturel comme référence. Sur les 28 années de la période 1970-1997, ce régime présente les résultats suivants :

- 7 années (70 ; 71 ; 74 ; 75 ; 88 ; 94 ; 95) donnent une crue supérieure à l'hydrogramme ORSTOM1.
- 11 années (72 ; 76 ; 77 ; 79 ; 82 ; 83 ; 84 ; 87 ; 90 ; 92 ; 93) donnent une crue bien inférieure à l'hydrogramme ORSTOM1 non calé en temps, avec un déficit moyen dépassant $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ par rapport à cet hydrogramme.
- 10 années donnent un hydrogramme dont l'efficacité vis à vis des cultures de décrue est probablement assez proche de celle de l'hydrogramme ORSTOM1.

La fréquence des crues naturelles aussi efficaces que l'hydrogramme ORSTOM1 s'élève donc à 0,61 sur la période 1970-1997.

4.3.3. Effet des variations du seuil de soutien de crue S_{sout}

On remarque sur les tableaux 1 à 3, que pour un seuil de turbinage S_{turb} donné, le fait d'abaisser le seuil de soutien de crue S_{sout} aboutit globalement aux résultats suivants :

- l'énergie moyenne produite diminue
- la fréquence des bonnes crues augmente dans un premier temps, mais peut finir, pour des valeurs trop faibles de S_{sout} , par stagner (pour $S_{\text{sout}} < 178 \text{ m}$ avec $S_{\text{turb}} = 182 \text{ m}$), voire baisser (pour $S_{\text{sout}} < 180 \text{ m}$ avec $S_{\text{turb}} = 185 \text{ m}$).

Ces résultats s'expliquent par le fait que l'abaissement de S_{sout} conduit à un déclenchement plus fréquent du soutien de crue, accompagné par un abaissement global du niveau de gestion du lac. Si l'on envisage de surcroît un faible seuil de turbinage, l'abaissement de la réserve dans le lac peut être si important que celle-ci ne suffit pas toujours pour assurer le soutien de crue jusqu'à son terme.

4.3.4. Effet des variations du seuil de turbinage S_{turb}

Pour un seuil de soutien de crue S_{sout} donné, le rehaussement du seuil de turbinage S_{turb} ne fait pas varier l'énergie produite de façon nette. Par contre, il permet d'obtenir de bonnes crues plus fréquemment, du fait que le niveau global de gestion du lac est plus élevé,

entraînant ainsi un déclenchement plus fréquent du soutien, avec une forte possibilité de le mener à terme.

4.3.4. Scénarios satisfaisants pour la production électrique et la fréquence des bonnes crues.

Un seuil de turbinage fixé à 182 m entraîne à la fois une faible production moyenne d'électricité, et une fréquence de crues correctement soutenues toujours inférieure à la fréquence des bonnes crues du régime naturel. Il semble donc peu raisonnable d'envisager une valeur aussi faible pour ce seuil S_{turb} . Par ailleurs, pour une même fréquence de crues correctement soutenues, l'énergie moyenne produite est beaucoup plus importante si l'on fixe le seuil de turbinage à 190 m plutôt qu'à 185 m. Enfin, contrairement aux valeurs plus faibles de S_{turb} , la valeur 190 m n'occasionne presque jamais de soutien de crue incomplet. Il ressort donc que parmi les trois valeurs testées pour le paramètre S_{turb} , c'est celle de 190 m qui donne les meilleurs résultats à tous points de vue, et que nous retiendrons pour la suite de cette note.

Le seuil de turbinage étant fixé à 190 m, il apparaît souhaitable de fixer le seuil de soutien de crue à une valeur inférieure ou égale à 190 m. Plus cette valeur sera faible, plus la fréquence des crues sera grande et plus l'énergie moyenne produite sera faible. Pour fixer les idées, on retiendra les deux résultats extrêmes suivants :

- Pour un seuil de soutien de crue S_{sout} égal à 190 m, la puissance moyenne produite est égale à 58,7 MW et la fréquence des crues correctement soutenues vaut 0,64, valeur légèrement supérieure à celle des bonnes crues du régime naturel.
- Pour un seuil de soutien de crue S_{sout} égal à 182 m, la puissance moyenne produite est égale à 44,7 MW et la fréquence des crues correctement soutenues vaut 0,86. Par rapport au soutien de crue à date mobile envisagé plus haut, on obtient le même nombre d'années sans soutien de crue, moyennant une perte de puissance produite de 1,4 MW. Cette perte, peu importante, est due au fait que dans le soutien à date fixe, les années pour lesquelles le soutien de crue n'est pas réalisé ne sont pas forcément celles qui auraient coûté le plus d'eau.

S _{sout} : niveau minimal (m) du lac au 20 août permettant de faire le soutien de crue	puissance moyenne produite (MW)	Energie moyenne produite par année (GWH)	années sans soutien de crue		années avec soutien de crue très incomplet		fréquence des crues correctement soutenues
			nombre	détail	nombre	détail	
176	30,7	268,9	1	86	11	77; 78; 79; 82; 83; 84; 85; 87; 90; 92; 93	0,57
178	36,1	316,2	6	77; 82; 85; 86; 87; 93	6	78; 79; 83; 84; 90; 92	0,57
180	39,3	344,3	9	77; 82; 84; 85; 86; 87; 89; 93; 94	5	78; 79; 83; 90; 92	0,50
182	43,8	383,7	13	77; 78; 80; 82; 84; 85; 86; 87; 88; 89; 91; 93; 94	3	79; 83; 90	0,43
184	50,8	445,0	19	77; 78; 79; 80; 81; 82; 83; 84; 85; 86; 87; 88; 89; 90; 91; 92; 93; 94; 97	0		0,32

Tableau 1: résultats obtenus sur la période 1970-1997, avec un seuil de turbinage S_{turb} de 182 m

S _{sout} : niveau minimal (m) du lac au 20 août permettant de faire le soutien de crue	puissance moyenne produite (MW)	Energie moyenne produite par année (GWH)	années sans soutien de crue		années avec soutien de crue très incomplet		fréquence des crues correctement soutenues
			nombre	détail	nombre	détail	
176	33,9	297,0	1	86	10	77; 78; 79; 82; 83; 84; 85; 87; 90; 93	0,61
178	37,8	331,1	4	82; 85; 87; 94	7	77; 78; 79; 83; 84; 90; 93	0,61
180	37,0	324,1	4	82; 84; 86; 93	6	77; 78; 79; 83; 87; 90	0,64
182	46,5	407,3	10	77; 80; 82; 84; 85; 86; 87; 91; 93; 94	3	79; 83; 90	0,54
184	49,0	429,2	12	77; 78; 80; 82; 84; 85; 86; 87; 89; 91; 93; 94	2	79; 83	0,50
186	53,0	463,8	15	77; 78; 79; 80; 82; 83; 84; 85; 86; 87; 88; 89; 91; 93; 94	0		0,46
188	62,1	544,0	20	73; 77; 78; 79; 80; 81; 82; 83; 84; 85; 86; 87; 88; 89; 90; 91; 92; 93; 94; 97	0		0,29
190	63,5	556,4	22	73; 77; 78; 79; 80; 81; 82; 83; 84; 85; 86; 87; 88; 89; 90; 91; 92; 93; 94; 95; 96; 97	0		0,21

Tableau 2: résultats obtenus sur la période 1970-1997, avec un seuil de turbinage S_{turb} de 185 m

S _{sout} : niveau minimal (m) du lac au 20 août permettant de faire le soutien de crue	puissance moyenne produite (MW)	Energie moyenne produite par année (GWH)	années sans soutien de crue		années avec soutien de crue très incomplet		fréquence des crues correctement soutenues
			nombre	détail	nombre	détail	
182	44,7	391,6	4	82; 84; 86; 94	0		0,86
184	51,0	446,8	6	80; 83; 85; 87; 91; 94	1	84	0,75
186	54,5	477,4	7	80; 82; 84; 85; 87; 91; 93	0		0,75
188	54,6	478,3	9	80; 82; 84; 85; 86; 88; 91; 93; 94	0		0,68
190	58,7	514,2	10	78; 80; 82; 84; 85; 86; 87; 91; 93; 94	0		0,64
192	70,3	615,8	16	77; 78; 79; 80; 82; 83; 84; 85; 86; 87; 88; 89; 91; 92; 93; 94	0		0,43
194	74,8	655,2	19	73; 78; 79; 80; 81; 82; 83; 84; 85; 86; 87; 88; 89; 90; 91; 92; 93; 94; 97	0		0,32

Tableau 3: résultats obtenus sur la période 1970-1997, avec un seuil de turbinage S_{turb} de 190 m

ANNEXE 4

Procédure recommandée pour le calcul des lâchers du barrage de Manantali, lors de la crue 1998-1999

1. *Principe général*

Les débits à lâcher lors de la crue de 1998-1999 doivent permettre de réaliser au niveau de Bakel un hydrogramme de crue "ORSTOM3" culminant à $3000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pendant 6 jours, suivi d'un hydrogramme d'étiage non encore défini. Pour les calculer, une nouvelle version du logiciel PROGEMAN a été remise ce jour au gestionnaire du barrage.

Les principes généraux du calcul sont les mêmes que ceux qui avaient été décrits dans la note de août 1997 accompagnant la première version de PROGEMAN :

PROGEMAN. Logiciel de calcul du débit à lâcher au barrage de Manantali, en vue d'obtenir un débit objectif sur le fleuve Sénégal au niveau de Bakel. Notice d'utilisation, et consignes pour la crue de 1997.

Les modifications apportées au logiciel sont signalées ci-dessous, ainsi que certains changements envisagés pour l'utilisation de ses résultats.

2. *Modifications apportées à la nouvelle version du logiciel.*

Les modifications portent essentiellement sur les points suivants :

- Prise en compte des données recueillies sur deux stations supplémentaires : Daka-Saidou et Makana
- Limitation automatique des extrapolations par autorégression, à la période juillet-octobre. En dehors de cette période, les extrapolations de valeurs de débits sont effectuées par un modèle exponentiel de tarissement, dont la constante de temps est réévaluée en permanence à partir des dernières données connues.
- Visualisation des valeurs de débit fictif correspondant aux quatre entités suivantes : station de Soukoutali en régime naturel ; station de Kayes en régime naturel ; apports intermédiaires entre les stations de Manantali, Oualia et Kayes ; apports intermédiaires entre les stations de Kayes, Gourbassy et Bakel.
- Modification du calcul de propagation des débits à l'aval du barrage, avec un nouveau mode d'évaluation des apports intermédiaires entre les stations. Celle-ci se fait désormais sur la base des seuls débits théoriques de régime naturel relatifs aux stations de l'amont.
- Possibilité de changer l'année traitée. Ceci, associé aux extrapolations par modèle de tarissement citées plus haut, permet d'envisager l'utilisation du logiciel pendant toute la durée de la campagne.
- Modifications de paramètres de calcul. Ceci concerne essentiellement une légère modification de l'étalonnage de basses eaux de la station de Bakel.

3. Modifications concernant les consignes d'utilisation du logiciel

3.1. Fréquence de réglage des vannes

Alors qu'un réglage de vannes était effectué trois fois par jour pendant la crue de 1997, il a été décidé en commun accord avec le gestionnaire du barrage que ces opérations ne seraient désormais effectuées a priori que deux fois par jour. Ceci nous amène donc à envisager la procédure décrite ci-dessous, dont la nécessité résulte du fait que PROGEMAN fonctionne au pas de temps journalier.

Si l'on note de façon symbolique $X_j(8)$ l'ensemble des données observées datées du jour j à 8h pour les différentes stations, et si on suppose qu'on obtient chaque jour de nouvelles données à 8h, 12h et 18h, alors on effectuera les opérations suivantes:

le jour j à 8H :

- saisie de la moyenne de $X_{j-1}(8)$, $X_{j-1}(12)$ et $X_{j-1}(18)$ pour le jour $j-1$, pour toutes les stations y compris Manantali.
- saisie de $X_j(8)$ pour le jour j , pour toutes les stations sauf Manantali
- calcul de lâcher pour le jour j et réglage des vannes sur le lâcher obtenu

le jour j à 18H :

- saisie de la moyenne de $X_j(18)$, $X_{j-1}(12)$ et $X_{j-1}(18)$ pour le jour J , pour toutes les stations sauf Manantali
- calcul de lâcher pour le jour j et réglage des vannes sur le lâcher obtenu

3. 2. Procédures de correction manuelle des lâchers calculés par PROGEMAN

3.2.1 En cas de non convergence du processus de calcul itératif.

Bien que le processus de calcul itératif des lâchers a toujours convergé de façon satisfaisante l'an dernier, il est toujours prévu une procédure de correction à mettre en œuvre en cas de non convergence.

Notons, en $m^3 s^{-1}$:
QL la valeur de débit à lâcher calculée par le programme PROGEMAN
Qb le débit prévu à Bakel, calculé par PROGEMAN, résultant du lâcher QL

Qbo le débit objectif à Bakel

E l'écart entre débit prévu et objectif à Bakel : $E = Qb - Qbo$

Q la valeur de débit à lâcher corrigée

Pendant la montée de l'hydrogramme ORSTOM3:

si $E > 188$ alors: $Q = QL - E + 188$

si $188 > E > -188$ alors: $Q = QL$ (donc pas de correction dans ce cas)

si $-188 > E$ alors: $Q = QL - E - 188$

Exemples, pour $QL=1000$:

$E = 300 \implies Q = 1000 - 300 + 188 = 888$

$E = 100 \quad \Rightarrow \quad Q = 1000$
 $E = - 150 \quad \Rightarrow \quad Q = 1000$
 $E = - 400 \quad \Rightarrow \quad Q = 1000 - (- 400) - 188 = 1000 + 400 - 188 = 1212$

Pendant la descente de l'hydrogramme ORSTOM3:

si $E > 35$ alors: $Q = QL - E + 35$
 si $35 > E > - 35$ alors: $Q = QL$ (donc pas de correction dans ce cas)
 si $- 35 > E$ alors: $Q = QL - E - 35$

exemples, pour $QL = 1000$:

$E = 50 \quad \Rightarrow \quad Q = 1000 - 50 + 35 = 985$
 $E = 20 \quad \Rightarrow \quad Q = 1000$
 $E = - 15 \quad \Rightarrow \quad Q = 1000$
 $E = - 40 \quad \Rightarrow \quad Q = 1000 - (- 40) - 35 = 1000 + 40 - 35 = 1005$

3.2. 2 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), voire les modèles de propagation utilisés.

Contrairement à ce qui a été fait l'an passé, il est préconisé de l'appliquer désormais sur les écarts constatés (entre débits prévu et observé) au niveau de Kayes et non plus de Bakel. Cette décision a été prise dans le but de diminuer les temps de retard mis en jeu, et aussi parce que les principaux écarts ont été observés sur Kayes.

Le principe de ce calcul est le suivant, pour le jour j : si on constate que le débit obtenu à Kayes au jour $j-1$ s'écarte de la dernière valeur de débit prévue pour cette station au jour $j-1$, on diminue en conséquence le lâcher du barrage (jour j) par rapport à la demande calculée par PROGEMAN, de six dixièmes de l'écart constaté. Cette correction doit prendre en compte l'éventuelle différence entre le débit lâché (jour $j-3$ environ) à l'origine du débit obtenu à Kayes le jour $j-1$, et la demande de lâcher calculée par PROGEMAN.

Si l'on note:

$Q_{Kayobtenu}$: le débit moyen journalier obtenu à Kayes

$Q_{Kayprévu}$: le débit moyen journalier prévu à Kayes, calculé par PROGEMAN

$Q_{lâché}$: 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 :

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

$Correction(j) = 0,6 \{ Q_{Kayprévu}(j-1) - Q_{Kayobtenu}(j-1) + [Q_{lâché}(j-3) - Q_{demandé}(j-3)] \}$

En pratique, on prendra :

$Q_{\text{lâché}}(j-3) - Q_{\text{demandé}}(j-3) =$

$$0,5 [Q_{\text{lâché}}(j-3, 8H) - Q_{\text{demandé}}(j-3, 8H) + Q_{\text{lâché}}(j-3, 18H) - Q_{\text{demandé}}(j-3, 18H)]$$

La valeur de $Q_{\text{kayprévu}}(j-1)$ est celle qui aura préalablement été prévue par PROGEMAN pour le jour $j-1$, lors du calcul effectué le jour $j-2$ à 18H.

Par mesure de prudence, on limitera les corrections à l'intervalle $[-300, 300]$

La procédure à suivre est donc la suivante:

- 1- le matin, effectuer avec PROGEMAN le premier calcul de lâcher du jour j
- 2- calculer comme indiqué ci-dessus, le terme $\text{Correction}(j)$
- 3- Appliquer la correction calculée le matin sur les deux lâchers calculés dans la journée

4. Valeurs de débit lâché à saisir avec PROGEMAN

La valeur de débit lâché le jour $j-1$, qu'il faudra saisir dans PROGEMAN le jour j à 8H, est celle qui aura été calculée par le gestionnaire à l'aide de la même procédure que celle qui a été utilisée en 1997. Autrement dit, même s'il apparaissait en cours de saison qu'un biais existe dans l'étalonnage de vanne actuellement utilisé, c'est quand-même celui-ci qui devra être utilisé jusqu'à nouvel ordre.

ANNEXE 5

Evaluation des débits écoulés à l'aval de Bakel en 1998

Les cotes relevées aux différentes stations de la vallée ont été traduites dans un premier temps à l'aide des étalonnages les plus récents qui étaient disponibles au moment du calcul (voir tableau 1). Ces étalonnages relatifs à l'écoulement dans le lit mineur, sont basés sur la méthode du gradient limnimétrique. Ils ont été établis ou révisés par J.P. Lamagat (JPL) ou J.C. Bader (JCB) en 1989, 1992 ou 1998, et sont basés sur des jaugeages très anciens pour certaines stations (voir tableau 2). C'est le cas en particulier pour Salde, Ngoui, Podor, Guede, Dagana et Rosso. Une révision des étalonnages est actuellement menée dans le cadre du projet, en utilisant des résultats de mesures plus récentes. Les résultats de ce travail n'étant pas encore connus au moment de calculer le bilan de volume, il a été décidé d'appliquer aux débits Q1 obtenus avec les étalonnages disponibles, une correction tenant compte des mesures ponctuelles de débit effectuées au cours de l'année 1998.

Les corrections effectuées ont pour but de contourner les deux obstacles suivants :

- il est possible que les étalonnages, basés sur des mesures très anciennes, ne soient plus valides pour l'année 1998
- il est évident que l'étalonnage des stations situées le plus en aval donne des débits faux en basses eaux, lorsque les cotes sont influencées par le niveau du barrage de Diama.

Les mesures ponctuelles de débit Q2 ont tout d'abord été corrigée pour les transformer en débit moyen journalier Q3 selon les principes suivant : Q3 se situe entre Q1 et Q2, le plus près possible de Q1 ; la valeur absolue de la correction effectuée ($Q3 - Q2$) ne peut excéder la moitié de la valeur absolue du gradient journalier de débit obtenu sur Q1. Les débits Q3 obtenus ont ensuite été utilisés pour chaque station comme points pivots entre lesquels les débits ont été reconstitués (Q4) soit par déformation des séries de débit Q1 de la station, soit à partir des débits Q4 d'une station voisine, soit par interpolation linéaire lorsque celle-ci était la seule solution envisageable. Les figures 1 à 3 montrent les variations du débit Q4 obtenu à chaque station, avec superposition des débits Q1, Q2 et Q3 qui ont permis de l'obtenir.

Les séries de débit Q4 sont d'autant plus fiables que les valeurs Q3 déduites directement des mesures sont nombreuses, et que l'écart entre Q1 et Q4 est faible (correction moindre). Ces conditions sont réunies pour les stations de Bakel, Matam et Salde, pour lesquelles les étalonnages donnent des valeurs assez proches des débits mesurés. A Ngoui, Podor, et Guede, les débits Q4 obtenus peuvent être également considérés comme assez fiables du fait que les points mesurés sont relativement nombreux. Les écarts constatés entre Q1 et Q4 montrent qu'un détarage a dû se produire à Ngoui et Guede, et qu'un nouvel étalonnage devra être établi pour ces stations. Pour Podor et Guede, on constate comme prévu que le remous du barrage de Diama ne permet plus de traduire les faibles cotes en débit par la méthode du gradient limnimétrique. Pour Kaédi, l'unique débit mesuré, bien que très proche de la valeur obtenue avec l'étalonnage, est insuffisant pour conclure sur la validité de ce dernier. Cet étalonnage étant cependant basé sur des jaugeages pas trop anciens, on peut accepter tels quels les débits Q1 obtenus pour cette station, qui n'est pas atteinte par le remous de Diama. Enfin, les série de débits Q1 obtenus à Dagana et Rosso ne peuvent être exploitées, du fait du manque de mesures directes de débit permettant de les recalculer. Le remous de Diama y influence la presque totalité de l'hydrogramme. La traduction des cotes par la méthode du gradient limnimétrique ne peut plus être envisagée, à ces deux stations, qu'en hautes eaux. A ce titre, les débits de pointe Q1 obtenus avec les étalonnages de

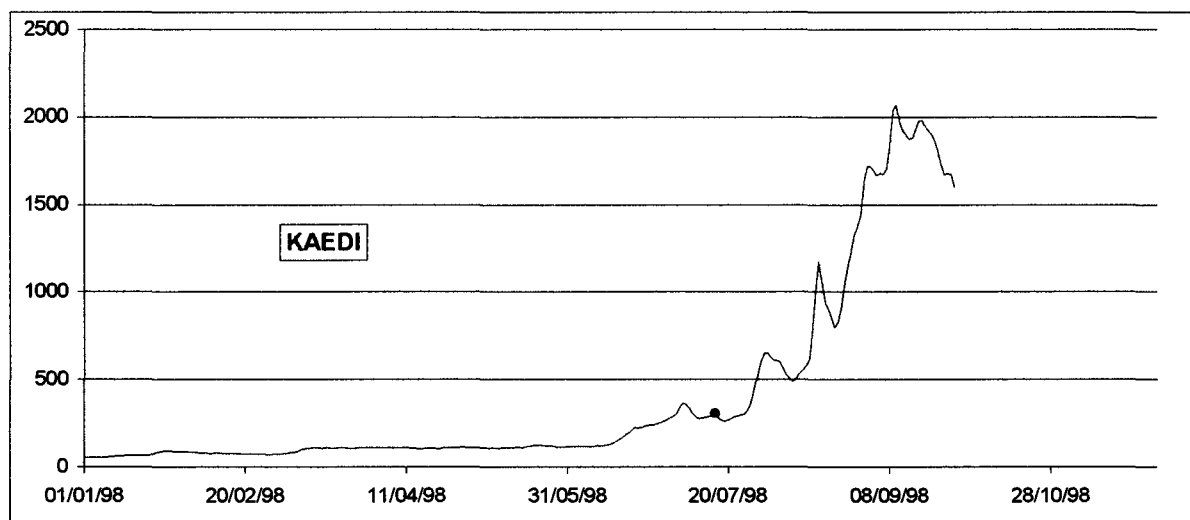
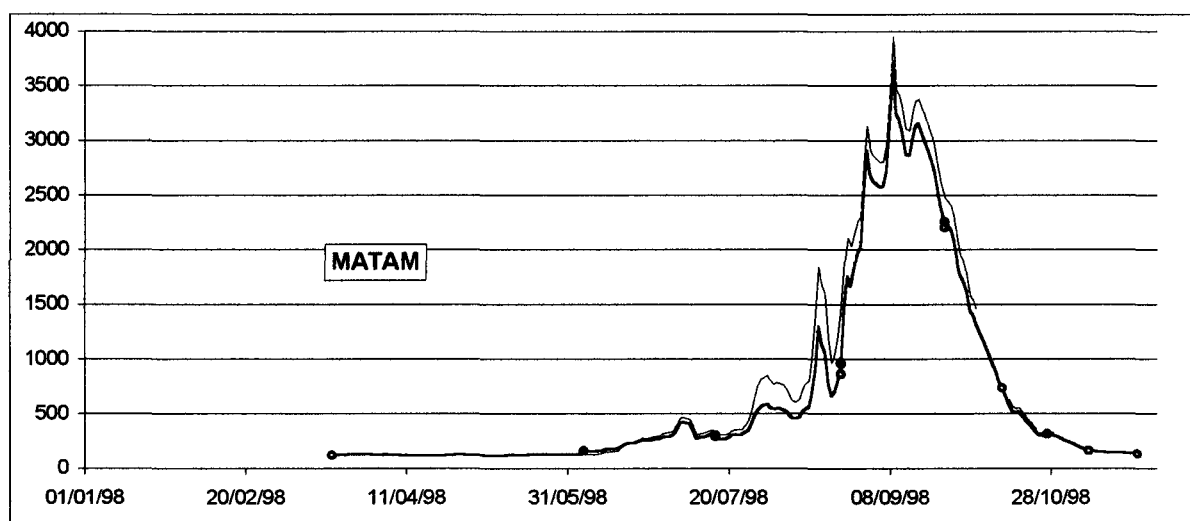
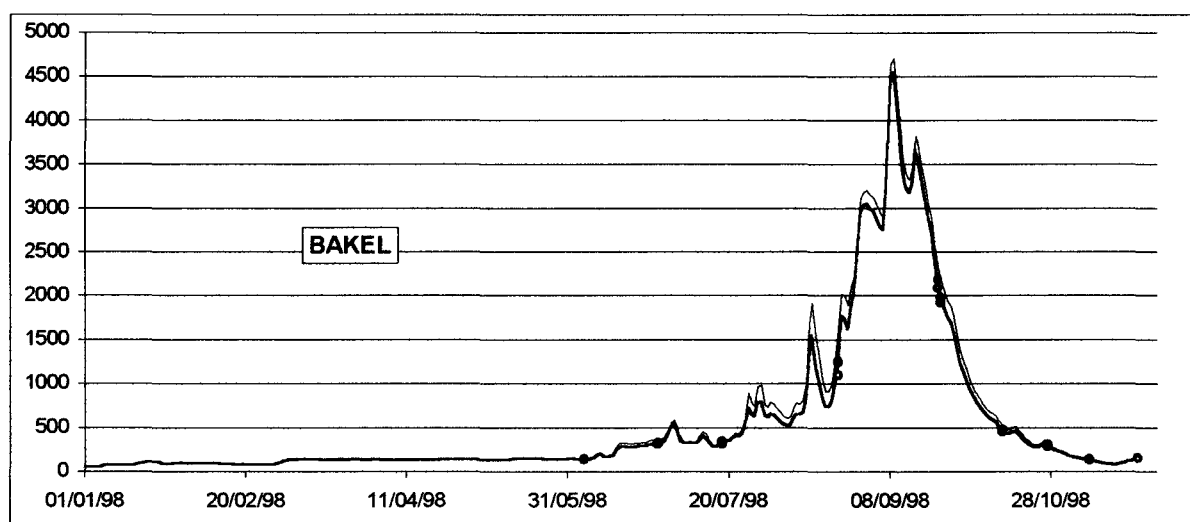
Dagana et Rosso sont consistants. Leurs valeurs légèrement supérieures à 2000 m³/s semblent cohérentes avec celles des stations situées à l'amont.

Bakel				Matam				Kaedi				Salde				Ngoui				Podor				Guede				Dagana				Rosso			
H (cm)	Qo (m³/s)	H (cm)	K	H (cm)	Qo (m³/s)	H (cm)	K	H (cm)	Qo (m³/s)	H (cm)	K	H (cm)	Qo (m³/s)	H (cm)	k	H (cm)	Qo (m³/s)	H (cm)	k	H (cm)	Qo (m³/s)	H (cm)	k	H (cm)	Qo (m³/s)	H (cm)	k	H (cm)	Qo (m³/s)	H (cm)	k	H (cm)	Qo (m³/s)	H (cm)	k
40	0	0	150	-60	0	0	137	-80	0	-80	150	0	0	0	332	0	0	0	240	44	0	44	0	70	0	0	100	44	0	0	70	23	0	0	100
50	4	220	150	-50	2	250	137	-70	1	530	150	10	1	350	332	232	0	500	240	60	40	175	314	80	2	500	100	46	2	100	70	27	0	100	100
70	15	350	90	-30	7	425	125	-50	4	580	160	20	3	400	332	250	2	510	240	80	91	301	259	90	9	510	280	54	35	150	90	32	3	120	200
80	22	900	50	0	21	750	125	-25	15	620	175	40	8	450	332	275	7	640	240	100	141	381	435	102	20	640	280	70	130	200	130	36	18	170	200
100	41	1000	50	30	42	850	200	0	31	660	193	60	15	500	330	300	15	650	240	120	191	481	418	132	50	650	240	82	210	225	150	40	44	190	300
120	64			60	74	1000	200	25	52	700	214	80	22	550	327	350	38	700	240	140	242	700	909	185	100	700	240	93	285	250	190	48	106	240	300
140	91			100	123			50	74	800	275	100	32	600	320	400	66	1200	240	160	292			250	159	800	240	101	335	275	240	56	178	260	450
190	177			150	196			100	125	1000	275	125	45	650	324	445	100			180	343			300	205			122	484	300	304	72	323	360	450
250	311			200	273			150	185	1300	275	150	59	700	330	500	141			200	393			350	250			150	684	325	346	151	1060		
325	517			250	376			200	249			200	87	750	344	550	180			220	449			400	296			178	891	350	393	190	1425		
400	755			300	502			250	318			250	127	800	350	574	200			240	506			450	345			207	1112	375	427	230	1810		
450	945			350	649			300	406			300	172	850	330	650	263			260	564			500	411			228	1264	400	460	270	2205		
500	1170			400	827			350	511			350	219	900	260	680	300			280	623			550	495			265	1538	425	480	309	2610		
600	1640			450	1069			400	638			400	271	950	160	800	468			300	683			600	600			290	1733	435	486	349	3020		
700	2170			500	1340			450	781			450	333	1000	100	897	700			320	745			650	716			315	1931	600	486	388	3432		
800	2750			550	1640			500	937			500	393			988	1000			340	808			700	843			341	2131						
900	3510			600	1960			550	1100			550	463			1050	1289			360	875			750	979			359	2275						
1000	4360			650	2290			600	1278			600	533			1082	1500			380	941			800	1125			384	2482						
1100	5265			700	2630			650	1467			650	611			1150	2132			400	1007							499	3434						
1200	6270			750	2970			700	1664			700	691			1173	2500			420	1073														
1300	7600			800	3320			750	1882			750	769							440	1140														
				850	3675			800	2120			800	874							460	1206														
				900	4025			850	2370			850	971							480	1272														
				950	4270			899	2635			900	1060							500	1338														
				999	4711							950	1208							520	1405														
												999	1384							540	1471														
																				560	1537														
																				580	1603														
																				600	1670														
																				620	1736														
																				640	1802														
																				660	1868														
																				680	1935														
																				700	2001														

tableau 1 : Etalonnages utilisés pour calculer le bilan de volume écoulé dans la vallée du Sénégal entre le 5 juin et le 24 novembre 1998, avec Qo (m³/s) représentant le débit en régime permanent, et K (jour/cm) le coefficient de correction de gradient. Pour les cotes non influencées par le barrage de Diama, le débit est obtenu par : $Q = Qo * \text{racine} (1 + 0,0001 * K * \text{grad} (H))$.

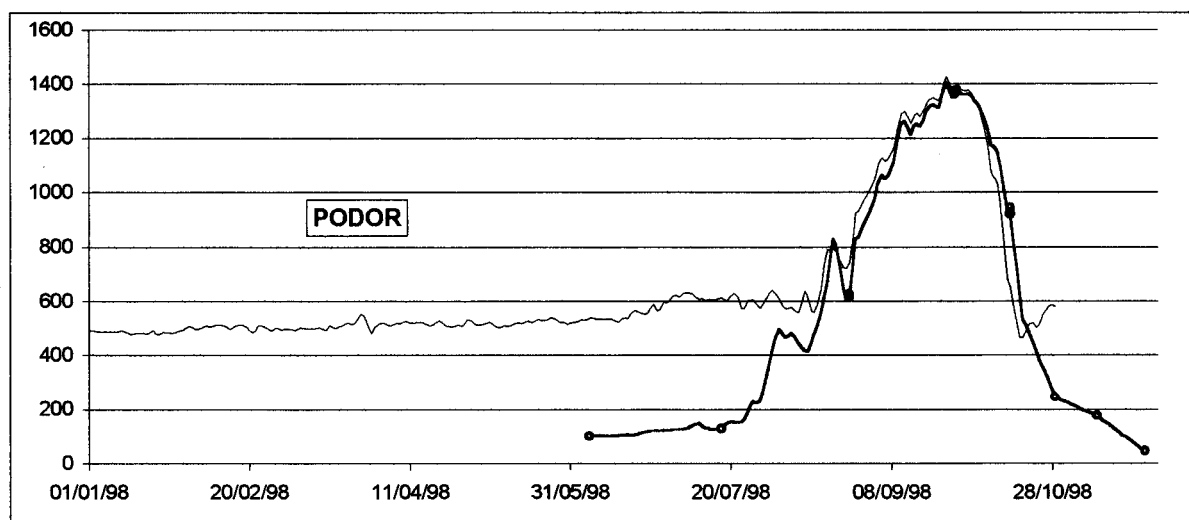
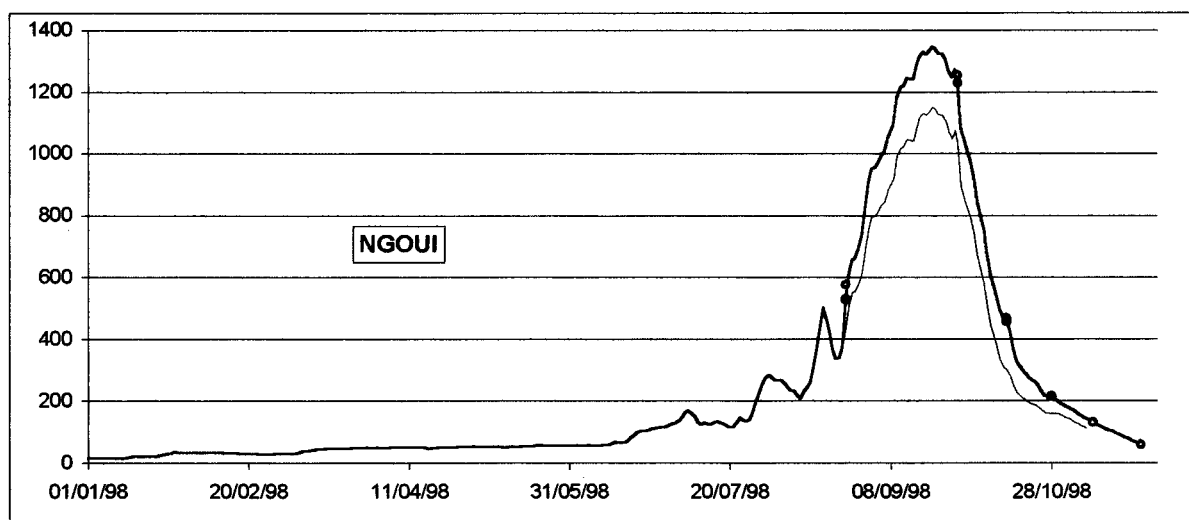
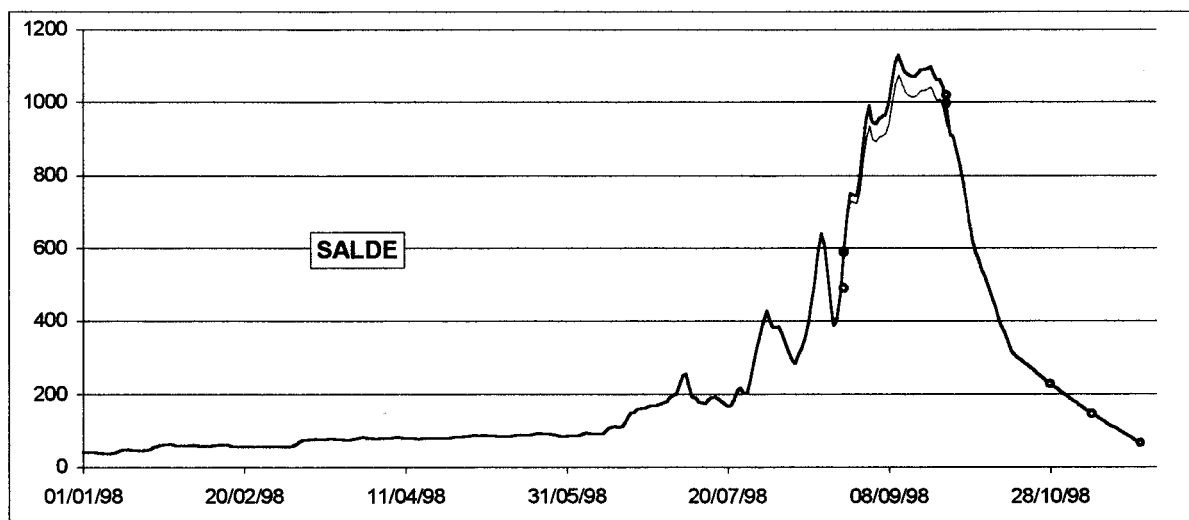
station	Bakel	Matam	Kaedi	Salde	Ngoui	Podor	Guede	Dagana	Rosso
nombre de jaugeages	> 111	46	67	64	54	64	75	82	42
période couverte par les jaugeages	1972-1998	1974-1985	1955-1986	1955-1962	1955-1963	1956-1964	1956-1963	1950-1986	1957
nombre de jaugeages avec gradient positif	> 85	16	33	30	17	42	32	41	32
nombre de jaugeages avec gradient négatif	>118	30	34	31	34	21	43	41	10
plus fort gradient positif (cm/jour) observé lors des jaugeages	104	43	28	14	7	15	39	10	9
plus petit gradient négatif (cm/jour) observé lors des jaugeages	-48	-14	-18	-14	-17	-22	-17	-20	-15
plus forte cote jaugée (cm)	1061	800	868	1008	1168	650	750	454	330
plus petite cote jaugée (cm)	20	-47	-53	24	468	90	231	99	83
écart-type des débits mesurés (m ³ /s)	1071	826	695	421	646	462	256	715	612
auteur	JCB (1992) JPL (1198)	JPL (1989)	JPL (1989)	JPL(1989) JCB (1998)	JCB (1992)	JCB (1992)	JCB (1992)	JPL (1989) JCB (1992)	JCB (1992)

tableau 2 : origine et consistance des étalonnages utilisés



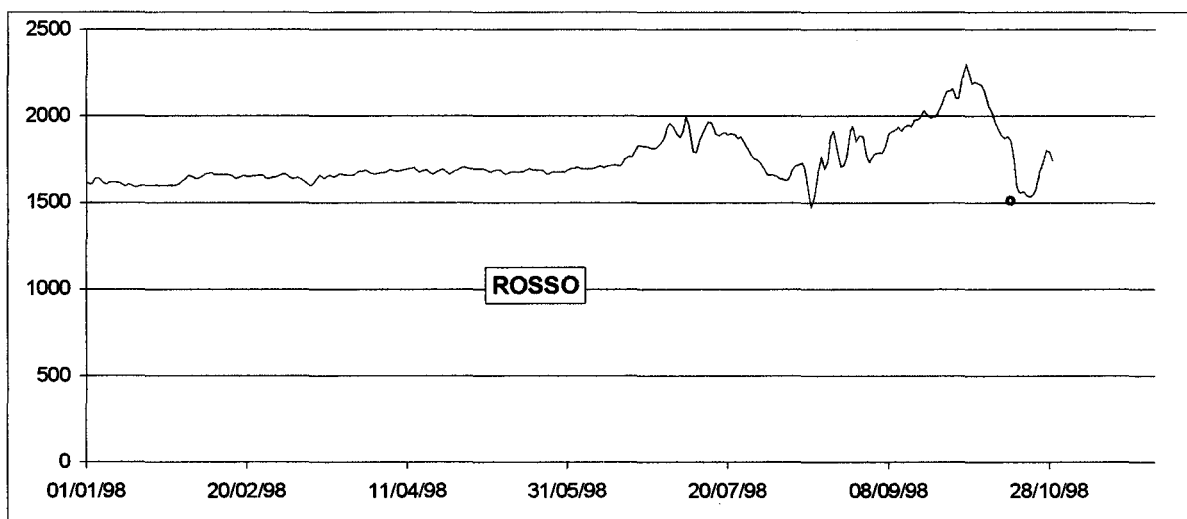
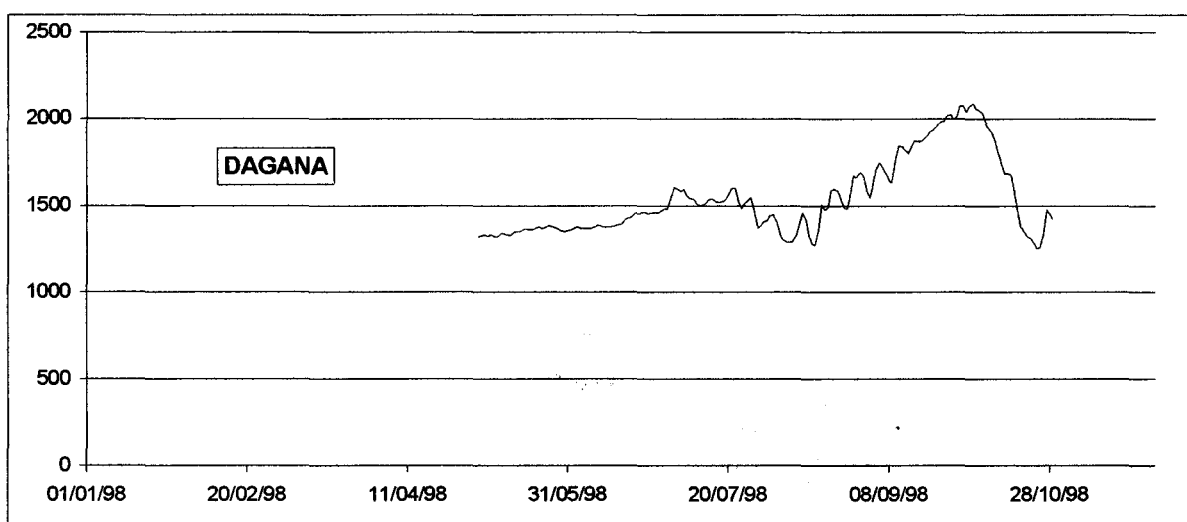
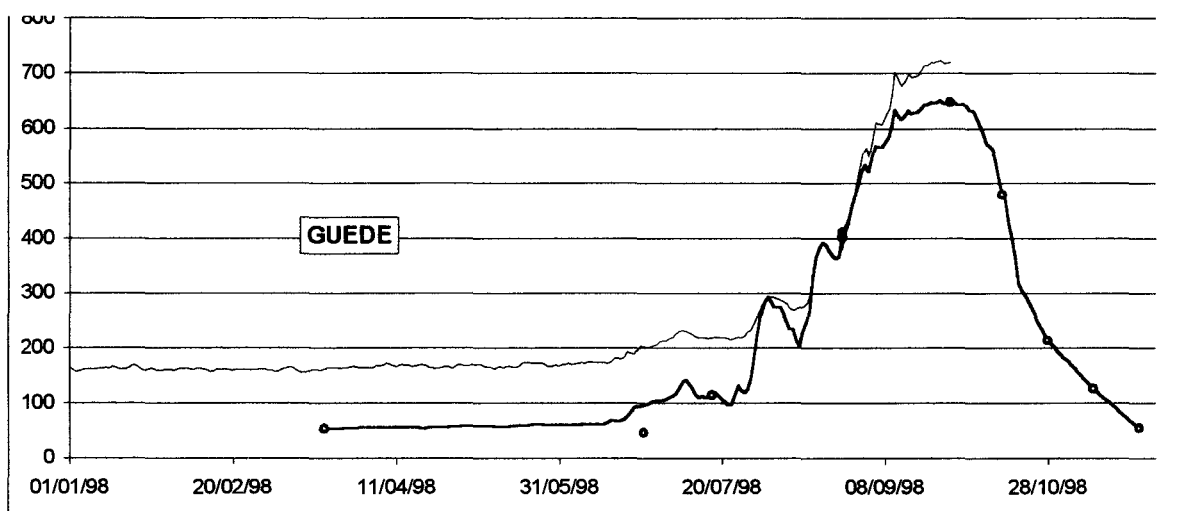
- Q1 : débit obtenu par cote et étalonnage
- Q2 : débit jaugé instantané
- Q3 : débit jaugé corrigé (moyen journalier)
- Q4 : débit moyen journalier corrigé et complété

Figure 1 : débit moyen journalier (m^3/s) écoulé en 1998 dans le lit mineur à Bakel, Matam et Kaédi.



- Q1 : débit obtenu par cote et étalonnage
- Q2 : débit jaugé instantané
- Q3 : débit jaugé corrigé (moyen journalier)
- Q4 : débit moyen journalier corrigé et complété

Figure 2 : débit moyen journalier (m^3/s) écoulé en 1998 dans le lit mineur à Salde, Ngoui et Podor



- Q1 : débit obtenu par cote et étalonnage
- Q2 : débit jaugé instantané
- Q3 : débit jaugé corrigé (moyen journalier)
- Q4 : débit moyen journalier corrigé et complété

Figure 3 : débit moyen journalier (m^3/s) écoulé en 1998 dans le lit mineur à Guede, Dagana et Rosso