



ORGANISATION POUR LA MISE EN VALEUR DU FLEUVE SENEGAL
(O . M . V . S .)

PROGRAMME D'OPTIMISATION DE LA GESTION DES RESERVOIRS

PHASE II

SYNTHESE

OCTOBRE 1999

AUTEURS : JP LAMAGAT, JC BADER, P VAUCHEL



Institut de recherche
pour le développement

TABLE DES MATIERES

page

3	Mesures et courbes de tarage
7	Synthèse du manuel provisoire de gestion de Manantali
A1	Annexe 1 : Mesures de débit
A2	Annexe2 : Résultats obtenus par suivi des cuvettes expérimentales
A3	Annexe 3 : Synthèse de divers travaux concernant la gestion stratégique et opérationnelle de Manantali et diama
A3.4	Annexe 3.1 : Révision des modèles de propagation de débit entre Manantali, Oualia, Kayes, Gourbassy, Bakel
A3.22	Annexe 3.2 : Nouveau calage du modèle de courbe de remous de Diama
A3.40	Annexe 3.3 : Coût en eau du soutien de crue dans le fleuve Sénégal en fonction de l'hydraulicité de août à octobre
A3.52	Annexe 3.4 : Gestion préconisée quand la réserve disponible à Manantali ne permet pas de soutenir la crue
A3.58	Annexe 3.5 : Note sur le soutien de crue à date fixe sur le fleuve Sénégal
A3.72	Annexe 3.6 : Glossaire de quelques termes employés dans le manuel provisoire de gestion
A4	Annexe 4 : Réponses de l'IRD aux remarques concernant le rapport intérimaire de phase 2 et le manuel provisoire
A5	Annexe 5 : Influence de l'invasion du typha

SYNTHESE DE PHASE II

La présente synthèse finale de PHASE II est publiée contractuellement, elle fait le point sur les compléments intervenus depuis la remise, au mois de mai 1999, du document de fin de campagne 1998/99 (tomes 1 à 5 et Manuel de Gestion).

Chaque tome est repris et des compléments éventuels sont produits en annexe. Ces compléments correspondent à des événements nouveaux intervenus entre le CS de juin et octobre 1999, ou bien sont des réponses à des questions posées lors du CS.

Le chronogramme des tâches de la Phase II s'étalait sur la période avril 1998 (notification du contrat le 6 avril – début des travaux 1^{er} mai 1998) durant 18 mois, la remise du rapport final intervenant fin octobre, début novembre 1999.

Lors du Comité de Suivi de juin 1999, des remarques préalables à ce Comité ont été formulées, elles sont parvenues à l'IRD en ordre dispersé, et certaines sont parvenues après le Comité, ou ne sont jamais parvenues.

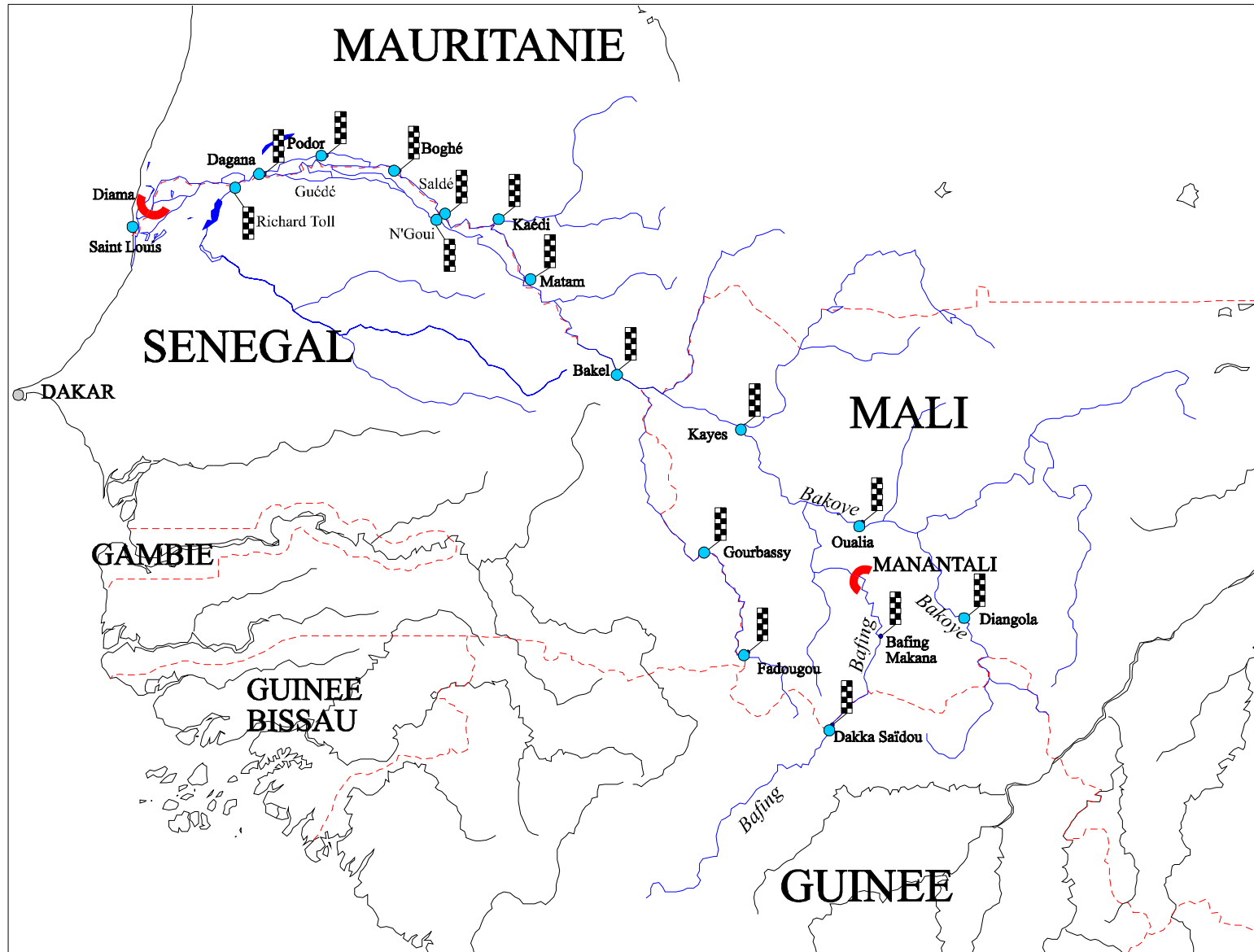
Les réponses à ces remarques sont reportées en annexe.

Les recommandations du Comité de Suivi ont été prises en compte, deux rapports demandés ont été publiés, l'un intéressant la non faisabilité d'un modèle pluie-débit, remis le 14 juillet 1999, l'autre concernant l'invasion du Typha, il est publié en annexe du présent rapport.

Le manuel de gestion fait l'objet d'une note synthétique et de la publication d'un glossaire des termes utilisés.

Afin que les destinataires des rapports puissent utiliser plus directement les rapports édités, un CDROM est fourni avec le présent rapport, il contient les 5 tomes du rapport provisoires ainsi que le présent rapport (en format WORD 97).

Carte n°1 – Réseau des stations hydrologiques utilisées par l'OMVS



1. MESURES ET COURBES DE TARAGE

Le tableaux n°1 contient les résultats des mesures de débits effectuées depuis le 1^{er} juillet 1999. Les mesures précédentes sont répertoriées dans les tableaux contenus dans le tome 4 du rapport provisoire (tableaux 1 à 3 - pages 6 à 10).

Toutes les mesures de débit ont été réalisées au profileur de courant « ADCP » à effet DOPPLER. Les mesures semblent d'une qualité très supérieure à celles réalisées avec le matériel conventionnel, moulinet, saumon, etc.

En effet, lors d'une mesure en crue, la turbidité ne permet pas de surveiller la position de l'axe du moulinet et il apparaît que les remous qui sont fréquents sur les bords des cours d'eau, et même près du fond ne sont pas pris en compte. Les vitesses ne sont pas parallèles à l'axe de la rivière, et quelquefois sont inversées, or, l'hydrologue cumule ces vitesses et introduit, ce faisant, des erreurs qui peuvent être importantes.

Lors d'une mesure par ADCP, seule, la composante de la vitesse perpendiculaire à la section de mesure est prise en compte, avec son signe réel.

Les mesures, hormis BAKEL, ne sont pas assez nombreuses pour modifier correctement les courbes de tarage. Pour Kayes il est certain qu'une vérification s'impose, les mesures effectuées en crue donnant des résultats inférieurs à la courbe utilisée.

A Gourbassy, la différence n'est pas nette et la courbe peut être conservée en l'état.

1.1 BAKEL

Vingt sept mesures de débits ont été réalisées entre le 26 mars 1998 et le 20 octobre 1999. A l'aide de ces mesures, une courbe de tarage a été tracée. Elle montre nettement la qualité des résultats fournis par cette méthode moderne de mesures qu'est l'ADCP.

Le figure A1.1 en annexe 1 contient les résultats de l'analyse qui est détaillée en annexe. La dispersion des points de mesures est faible, et la courbe est de très bonne qualité. Il manque des mesures d'étiage, le débit minimum de soutien en basses eaux étant quasiment supérieur à 100 m³/s, cela est peu important.

Une analyse de la station a été refaite, il semble qu'il y ait trois périodes pour l'étalonnage de la station. Les dates de changement ne sont pas bien connues, mais on peut considérer avec peu de chance de se tromper que les trois fichiers de traduction correspondent aux périodes suivantes :

- Avant le 1er juillet 1974
- Du 1er juillet 1974 au 30 juin 1988
- Du 1er juillet 1988 à 2000.

Le dernier changement de tarage fera l'objet d'une analyse en utilisant les débits de Kayes et Gourbassy, il conviendra auparavant de vérifier le tarage de Kayes.

En l'état, nous considérons que le nouvel étalonnage doit être utilisé depuis la crue 88.

L'annexe « MESURES » montre les éventuelles modifications qui pourront intervenir dans le domaine des étalonnages des stations servant de base aux modèles.

Tableau n°1

Campagne 1999 de mesures des débits du fleuve Sénégal avec ADCP						
STATIONS	Jaugeages			Débits (m3/s)	Transect appareil	Observations
	Date	Heure	Cote moy.			
Gourbassi	27-août-99	12 h 30	556	918	T4 Rio	
	28-août-99	17 h 45	612	1050	T4 Rio	
	19-oct-99	11 h 15	359	399	T4 Mon	
Kayes	27-août-99	18 h 50	712	2170	T4 Mon	section au niveau de la centrale électrique
	28-août-99	09 h 20	776	2495	T4 Mon	
Kidira	27-août-99	13 h 10	835	1140	T4 Mon	section en aval du pont de chemin de fer
	28-août-99	15 h 35	796	1130	T4 Mon	
	07-sept-99	11h 30	627	746	T4 Mon	
	20-oct-99	15 h 10	451	429	T4 Mon	
Bakel	13-août-99	12 h 55	605	1567	T4 Mon	
	13-août-99	13 h 36	612	1588	T4 Mon	
	26-août-99	11 h 28	1029	3600	T4 Mon	
	26-août-99	13 h 20	1031	3870	T4 Mon	
	26-août-99	17 h 40	1039	4080	T4 Mon	
	27-août-99	09 h 15	1068	4280	T4 Mon	
	29-août-99	09 h 00	1091	4300	T4 Mon	
	29-août-99	17 h 20	1093	4380	T4 Mon	
	04-sept-99	13 h 15	986	3370	T4 Rio	
	07-sept-99	16 h 10	883	2670	T4 Mon	
	21-sept-99	08 h 40	817	2330	T4 Mon	
	06-oct-99	08 h 40	684	1700	T4 Mon	
	20-oct-99	17 h 30	713	1872	T4 Mon	
Matam (lit mineur)	14-août-99	10 h 55	475	1213	T3 Mon	section en aval de la ville
	30-août-99	12 h 25	829	3110	T4 Mon	
	04-sept-99	17 h 20	850	3160	T4 Rio	
	08-sept-99	10 h 35	830	2800	T4 Mon	
	21-sept-99	14 h 25	796	2510	T4 Mon	
	06-oct-99	12 h 00	697	1960	T4 Mon	
	21-oct-99	10 h 15	693	1975	T4 Mon	
Matam (débordements RG)	30-août-99	16 h 00	830 (Matam)	181	T4 Mon	total des trois ponts de la digue RG total des trois ponts de la digue RG total des trois ponts de la digue RG total des trois ponts de la digue RG total des trois ponts de la digue RG
	05-sept-99	08 h 20	848 (Matam)	315	T4 Rio	
	08-sept-99	14 h 30	830 (Matam)	324	T4 Mon	
	21-sept-99	16 h 30	796 (Matam)	265	T4 Mon	
	06-oct-99	16 h 30	696 (Matam)	93,6	T4 Mon	
Kaédi (lit mineur)	08-sept-99	12 h 00	795	2020	T4 Rio	
	08-oct-99	08 h 30	733	1554	T4 Rio	
Ngoui	15-août-99	10 h 55	709	529	T3 Mon	section 1.5 km à l'amont de la station section 1 km à l'amont des échelles
	31-août-99	16 h 15	985	1385	T4 Mon	
	05-sept-99	18 h 00	1026	1540	T4 Rio	
	08-sept-99	18 h 15	1036	1590	T4 Mon	
	22-sept-99	14 h 00	1057	1660	T4 Mon	
	01-oct-99	14 h 50	1031	1463	T4 Rio	
	07-oct-99	15 h 40	1010	1318	T4 Mon	
21-oct-99	18 h 00	996	1274	T4 Mon		
Saldé	15-août-99	09 h 17	534	477	T3 Mon	section 100 mètres en amont des échelles section 100 mètres en amont des échelles Jaugeage 500 m en aval de la confluence aval confluence Sénégal - Doué/Diamel aval confluence Sénégal - Doué/Diamel section au niveau des échelles aval confluence Sénégal - Doué/Diamel aval confluence Sénégal - Doué/Diamel
	31-août-99	13 h 30	835	1050	T4 Mon	
	05-sept-99	16 h 15	888	1157	T4 Rio	
	09-sept-99	09 h 30	892	1140	T4 Mon	
	22-sept-99	11 h 00	913	1133	T4 Mon	
	01-oct-99	13 h 15	887	1022	T4 Rio	
	07-oct-99	14 h 20	864	956	T4 Mon	
21-oct-99	16 h 55	849	943	T4 Mon		
Guédé	15-août-99	16 h 41	429	348	T3 Mon	
	01-sept-99	09 h 35	620	618	T4 Mon	
	06-sept-99	08 h 20	636	653	T4 Rio	
	09-sept-99	13 h 50	643	652	T4 Mon	
	23-sept-99	14 h 10	681	730	T4 Mon	
	03-oct-99	18 h 30	682	715	T4 Rio	
	08-oct-99	08 h 20	678	676	T4 Mon	
22-oct-99	16 h 00	667	659	T4 Mon		
Donaye (Gayo) (Sortie de cuvettes)	16-août-99	13 h 46	105	62,7	T4 Mon	plus environ 45 m3/s de débordement plus les débordements sur la digue plus les débordements sur la digue
	01-sept-99	15 h 30	283	239	T4 Mon	
	09-sept-99	17 h 15	333	305	T4 Mon	
	23-sept-99	10 h 50	401	395	T4 Mon	
	03-oct-99	16 h 10	413	360	T4 Rio	
	22-oct-99	09 h 50	400	345	T4 Rio	

Tableau n°2

STATIONS	Jaugeages			Débits (m3/s)	Transect appareil	Observations
	Date	Heure	Cote moy.			
Podor	16-août-99	17 h 39	300	525	T3 Mon	
	01-sept-99	12 h 30	444	1180	T4 Mon	
	06-sept-99	10 h 30	472	1330	T4 Rio	
	09-sept-99	15 h 20	484	1380	T4 Mon	
	23-sept-99	08 h 50	541	1545	T4 Mon	
	03-oct-99	14 h 15	561	1530	T4 Rio	
	09-oct-99	09 h 05	564	1487	T4 Mon	
	22-oct-99	14 h 00	556	1417	T4 Mon	
Dagana	02-sept-99	9 h 40	300	1730	T4 Mon	
	10-sept-99	8 h 10	315	1905	T4 Mon	
	23-sept-99	17 h 30	344	2186	T4 Mon	
	05-oct-99	09 h 40	363	2262	T4 Rio	
	08-oct-99	12 h 00	368	2254	T4 Mon	
	22-oct-99	18 h 20	378	2245	T4 Mon	
Richard - toll (Quai)	02-sept-99	11 h 55	272	1675	T4 Mon	section face au quai
	02-sept-99	13 h 15	272	1720	T4 Rio	section face au quai
	10-sept-99	9 h 00	281	1835	T4 Mon	section face au quai
	24-sept-99	09 h 25	306	2050	T4 Mon	section face au quai
	05-oct-99	12 h 30	322	2157	T4 Rio	section face au quai
	09-oct-99	14 h 30	331	2182	T4 Mon	section 400 m en aval du port
	23-oct-99	08 h 50	338	2147	T4 Mon	section 400 m en aval du port
Rosso	03-sept-99	8 h 10	249	1645	T4 Mon	section au niveau du passage du bac
	10-sept-99	14 h 50	257	1850	T4 Mon	section au niveau du passage du bac
	24-sept-99	11 h 30	278	1972	T4 Mon	section au niveau du passage du bac
	05-oct-99	13 h 25	294	2109	T4 Rio	section face aux échelles
	09-oct-99	15 h 47	302	2100	T4 Mon	section au niveau du passage du bac
	23-oct-99	10 h 30	408	2120	T4 Mon	section 1.5 km en aval du bac
Diama (Devant - barrage)	19-août-99	14 h 15	176 Amont 75 Aval	1000	T4 Mon	section devant les vannes
	03-sept-99	13 h 30	163 Amont 119 Aval	1730	T4 Mon	
	10-sept-99	17 h 00	157 Amont 138 Aval	1780	T4 Mon	
	25-sept-99	09 h 00	157 Amont 151 Aval	1960	T4 Mon	
	06-oct-99	12 h 00	166 Amont 158 Aval	2008	T4 Rio	
	06-oct-99	17 h 00	163 Amont 156 Aval	1962	T4 Rio	
	10-oct-99	10 h 00	169 Amont 161 Aval	2042	T4 Mon	
	23-oct-99	13 h 15	172 Amont 163 Aval	2074	T4 Mon	
Saint-Louis aval du pont Faidherbe	06-oct-99	08 h00	202	1803	T4 Rio	un seul bras en aval de St Louis
	06-oct-99	09 h40	200	1797	T4 Rio	total des deux bras
	06-oct-99	13 h40	198	1973	T4 Rio	un seul bras en aval de St Louis
	06-oct-99	19 h 00	200	1953	T4 Rio	total des deux bras
	10-oct-99	07 h 50	202	2040	T4 Mon	total des deux bras
Tahouey 100 m en amont pont barrage (entre le sénégal et le pont routier)	18-août-99	13 h 02	Pt/ barrage 236	48,2	T4 Mon	6 vannes ouvertes au pont routier
	02-sept-99	16 h 00	Pt/ barrage 260	60,3	T4 Mon	6 vannes ouvertes au pont routier
	10-sept-99	11 h 05	Pt/ barrage 267	74	T4 Mon	6 vannes ouvertes au pont routier
	24-sept-99	09 h 30	Pt/ barrage 290	93	T4 Mon	6 vannes ouvertes au pont routier
	05-oct-99	11 h 30	Pt/ barrage 362	101	T4 Rio	6 vannes ouvertes au pont routier
	08-oct-99	14 h 40	Pt/ barrage 323	4,1	T4 Mon	toutes les vannes fermées depuis le 7/10/99
	23-oct-99	08 h 55	Pt/ barrage 333	7,87	T4 Mon	toutes les vannes fermées depuis le 7/10/99
Tahouey (canal) aval pont CSS	18-août-99	11 h 14	Pt/ CSS 248	38,3	T4 Mon	section au niveau échelle Ndombo
	02-sept-99	16 h 00	Pt/ CSS 274	60	T4 Mon	
	05-oct-99	16 h 00	Pt/ CSS 317	96,5	T4 Rio	
Ronq (Digue)	17-août-99	18 h 05	198	7,5	T4 Mon	
Thiagar	17-août-99	19 h 24	210	1,86	T4 Mon	
Ndiawar	03-sept-99	10 h 30	227	5,52	T4 Mon	
Diamel (En aval de Matam, défluent)	30-août-99	13 h 15	829 (Matam)	640	T4 Mon	section 500 m en aval défluece
	04-sept-99	18 h 20	850 (Matam)	591	T4 Rio	
	08-sept-99	12 h 20	830 (Matam)	460	T4 Mon	
	21-sept-99	15 h 20	796 (Matam)	390	T4 Mon	
	06-oct-99	13 h 30	697 (Matam)	329	T4 Mon	
	21-oct-99	11 h 50	693 (Matam)	330	T4 Mon	
Matam (Sénégal en aval défluece Diamel)	30-août-99	13 h 00	829 (Matam)	2460	T4 Mon	section 500 m en aval défluece du Diamel
	08-sept-99	12 h 00	830 (Matam)	2310	T4 Mon	
	21-sept-99	14 h 50	796 (Matam)	2120	T4 Mon	
	06-oct-99	13 h 15	697 (Matam)	1628	T4 Mon	
	21-oct-99	11 h 30	693 (Matam)	1616	T4 Mon	

Tableau n°3

STATIONS	Jaugeages			Débits (m3/s)	Transect appareil	Observations
	Date	Heure	Cote moy.			
Ganguène Diamel bras principal (en rive gauche)	31-août-99	10 h 20	985 (Ngoui)	640	T4 Mon	section au niveau du village
	05-sept-99	17 h 00	1026 (Ngoui)	840	T4 Rio	
	09-sept-99	08 h 50	1037 (Ngoui)	890	T4 Mon	
	22-sept-99	10 h 10	1057 (Ngoui)	975	T4 Mon	
	01-oct-99	11 h 00	1031 (Ngoui)	841	T4 Rio	
	07-oct-99	13 h 30	1010 (Ngoui)	769	T4 Mon	
	21-oct-99	15 h 50	997 (Ngoui)	725	T4 Mon	
Ganguène Diamel bras secondaire (entre le sénégal et le diamel)	31-août-99	11 h 00	985 (Ngoui)	165	T4 Mon	300 m en amont de la confluence
	05-sept-99	16 h 45	1026 (Ngoui)	252	T4 Rio	
	09-sept-99	10 h 25	1037 (Ngoui)	288	T4 Mon	
	22-sept-99	11 h 30	1057 (Ngoui)	340	T4 Mon	
	01-oct-99	12 h 00	1031 (Ngoui)	272	T4 Rio	
	07-oct-99	13 h 50	1010 (Ngoui)	231	T4 Mon	
	21-oct-99	16 h 10	997 (Ngoui)	217	T4 Mon	
Galoya (début du Doué)	31-août-99	10 h 45	985 (Ngoui)	1320	T4 Mon	section 500 m en aval de la confluence
	05-sept-99	17 h 15	1026 (Ngoui)	1600	T4 Rio	
	09-sept-99	10 h 10	1037 (Ngoui)	1620	T4 Mon	
	22-sept-99	11 h 50	1057 (Ngoui)	1650	T4 Mon	
	01-oct-99	11 h 00	1031 (Ngoui)	1492	T4 Rio	
	21-oct-99	13 h 07	1010 (Ngoui)	1389	T4 Mon	
	21-oct-99	17 h 25	997 (Ngoui)	1339	T4 Mon	
Vending (fleuve Sénégal en amont de la défluece)	31-août-99	11 h 40	985 (Ngoui)	1640	T4 Mon	section face au village de Vending
	05-sept-99	15 h 50	1026 (Ngoui)	1713	T4 Rio	
	09-sept-99	09 h 05	1037 (Ngoui)	1610	T4 Mon	
	22-sept-99	10 h 30	1057 (Ngoui)	1505	T4 Mon	
	01-oct-99	11 h 45	1031 (Ngoui)	1417	T4 Rio	
	21-oct-99	14 h 15	1010 (Ngoui)	1369	T4 Mon	
	21-oct-99	16 h 40	997 (Ngoui)	1366	T4 Mon	
Vending (fleuve Sénégal en aval de la défluece) correspond au débit de saldé	31-août-99	12 h 15	985 (Ngoui)	1060	T4 Mon	section 500 m en aval de la défluece
	05-sept-99	16 h 10	1026 (Ngoui)	1157	T4 Rio	
	09-sept-99	09 h 30	1037 (Ngoui)	1140	T4 Mon	
	22-sept-99	11 h 00	1057 (Ngoui)	1133	T4 Mon	
	01-oct-99	11 h 45	1031 (Ngoui)	1013	T4 Rio	
	07-oct-99	14 h 20	1010 (Ngoui)	956	T4 Mon	
	21-oct-99	16 h 55	997 (Ngoui)	943	T4 Mon	
Galoya (liaison Sénégal-Doué)	31-août-99	11 h 15	985 (Ngoui)	595	T4 Mon	section en amont du petit bras section en amont du petit bras section en aval du petit bras section en amont du petit bras section en amont du petit bras section en amont du petit bras section en amont du petit bras
	05-sept-99	16 h 30	1026 (Ngoui)	556	T4 Rio	
	09-sept-99	10 h 05	1037 (Ngoui)	800	T4 Mon	
	22-sept-99	11 h 20	1057 (Ngoui)	372	T4 Mon	
	01-oct-99	12 h 30	1031 (Ngoui)	380	T4 Rio	
	07-oct-99	14 h 00	1010 (Ngoui)	398	T4 Mon	
	21-oct-99	16 h 25	997 (Ngoui)	437	T4 Mon	
Ngoui (bras d'alimentation / cuvette)	08-sept-99	18 h 40	1036 (Ngoui)	17.5	T4 Mon	100 m en aval de la défluece
Koundi (marigot) (à Adabaï, Mauritanie)	06-sept-99	14 h 00	472 (Podor)	29	T4 Rio	section à Adabaï
	03-oct-99	12 h 30	561 (Podor)	177	T4 Rio	
	22-oct-99	13 h 00	556 (Podor)	178	T4 Mon	section à Adabaï
Koundi (marigot) (à Samou, Mauritanie)	22-oct-99	12 h 30	556 (Podor)	220	T4 Mon	section devant Samou
Mbagne (marigot) (Mauritanie)	05-sept-99	15 h 15		52	T4 Rio	section en aval du pont de Mbagne
	01-oct-99	11 h 45		49.8	T4 Rio	
Tambass (marigot défluent) entre Richard-Toll et Rosso (Mauritanie)	24-sept-99	12 h 00	278 (Rosso)	30	T4 Mon	section à 500m de la défluece
	05-oct-99	13 h 25	294 (Rosso)	32.5	T4 Rio	

1. SYNTHÈSE DU MANUEL PROVISOIRE DES CONSIGNES DE GESTION DE MANANTALI

Le manuel provisoire de gestion de Manantali publié en Mars 1999, concerne la détermination en temps réel du débit qui doit être lâché par les différents organes d'évacuation du barrage, afin de satisfaire au mieux les objectifs de régularisation du débit (laminage des crues ; soutien d'étiage ; soutien de crue) et de production d'électricité.

Sa première partie présente les principes généraux de la gestion proposée.

La seconde donne le détail des différentes procédures de gestion opérationnelle.

La troisième partie analyse enfin les résultats d'une simulation numérique reproduisant la gestion proposée au pas de temps journalier pour 162 scénarios de consignes différents, sur la base des débits observés entre 1950 et 1998 sur le haut bassin du Sénégal.

Avant de pouvoir réaliser un manuel de gestion définitif, il sera nécessaire de définir les degrés de priorité accordés aux différents objectifs assignés à l'ouvrage. Il s'agira principalement de définir les éléments suivants :

- Pour le soutien d'étiage : hydrogramme minimal à assurer en basses eaux (Bakel); fréquence de défaillance (pénurie d'eau) acceptée.
- Pour le soutien de crue : hydrogramme objectif de crue (Bakel); fréquence des années pour lesquelles on accepte de renoncer au soutien de crue.
- Pour la production d'électricité : moyenne de l'énergie produite par année

Ces choix qui définiront la stratégie de gestion du barrage, sont du ressort de l'OMVS, qui devra tenir compte des possibilités présentées dans la troisième partie du manuel provisoire.

1.1. PRINCIPES GÉNÉRAUX DE LA GESTION PROPOSÉE

Le débit à lâcher du barrage doit être déterminé à partir des éléments suivants :

- contraintes de gestion imposées par les caractéristiques physiques de l'ouvrage ;
- consignes de sécurité visant à protéger l'ouvrage ;
- consignes de gestion concernant la régularisation des débits et la production d'énergie.

En fonction de la situation hydrologique du moment, ces contraintes et consignes imposent chacune une limite minimale ou maximale sur le débit total pouvant être lâché du barrage. Prises en compte par ordre de priorité décroissante, ces limites doivent alors être combinées pour en déduire le débit total à lâcher du barrage.

1.1.1. SUIVI DE LA SITUATION HYDROLOGIQUE

Les apports en eau doivent être suivis en temps quasi-réel par système radio sur un réseau composé des stations hydrométriques suivantes :

- Essentielles : Bakoye à Oualia ; Falémé à Goubassy ; Sénégal à Bakel ; Bafing à Daka-Saidou ; Sénégal à Kayes
- Importantes : Bafing à Makana ; Falémé à Fadougou ;
- Souhaitables : Bakoye à Diangola ; Bafing à l'amont de Daka-Saidou.

Pour la reconstitution de données manquantes ou l'extension nécessaire de certaines données de débit, il est prévu d'utiliser des modèles autorégressifs, de tarissement ou de propagation, ainsi que des valeurs médianes, en dernier ressort.

Au niveau du barrage, il faut suivre en temps réel l'évolution des paramètres suivants :

- Essentiels : cote du plan d'eau à l'amont du barrage ; débit total lâché ;

- Souhaitable : taux d'évaporation à la surface du plan d'eau.

1.1.2 CONTRAINTES DE GESTION

Les caractéristiques physiques de l'ouvrage permettent de déterminer le débit lâché du barrage lorsque ses organes d'évacuation sont ouverts au maximum. Ceci constitue pour le débit total lâché, une limite maximale croissante en fonction de la cote du plan d'eau amont.

Quand la retenue dépasse la cote 208,05 m, ces mêmes caractéristiques imposent un certain déversement par les vannes de surface destiné à éviter la submersion de ces dernières. Ceci constitue pour le débit total lâché, une limite minimale croissante en fonction de la cote du plan d'eau amont.

1.1.3 CONSIGNES DE SECURITE

A1 : Précaution contre la submersion des digues du barrage

Cette consigne impose une limite minimale au débit total lâché, pour éviter que le niveau du lac ne dépasse la cote maximale de sécurité (210,50 m) dans les jours à venir, tout en limitant au mieux le débit maximal lâché durant cette période. Cette limite minimale dépend de la cote du plan d'eau amont et du débit entrant dans la retenue, ainsi que des valeurs prévues pour ce dernier dans les jours à venir.

B1 : Submersion permanente de la partie basse du parement amont de l'ouvrage

Afin d'éviter l'endommagement par la houle du parement amont du barrage, cette consigne vise à maintenir le lac au dessus de la cote 187 m durant les 24 heures suivantes, en imposant au débit lâché une limite maximale qui dépend de la cote du plan d'eau amont et du débit entrant dans la retenue.

1.1.4 CONSIGNES DE GESTION

Les consignes de gestion envisagées sont présentées ci-dessous dans un ordre arbitraire.

1.1.4.1 Consignes définissant une limite minimale pour le débit lâché

A2 : Production d'énergie électrique

Dans un but de rentabilité, il est souhaitable qu'une énergie donnée soit produite en turbinant le moins d'eau possible. Dans cette optique, la consigne envisage les trois cas suivants :

- Quand la cote du lac est supérieure à un seuil S2, on vise à produire la puissance maximale qu'il est possible de produire avec cette cote : Pmax.
- Quand la cote du lac est comprise entre S1 (<S2) et S2, on vise à produire une puissance P définie par : $P = \min (P_o ; P_{max})$ où P_o désigne une puissance demandée prédéfinie.
- Quand la cote du lac est inférieure à S1, la consigne de production d'énergie n'est pas prise en compte.

Dans les deux premiers cas, la consigne permet d'évaluer en fonction de la cote du plan d'eau amont, le débit minimal lâché qui permet de produire la puissance visée.

A3 : Lâcher de débit sanitaire réservé

A4 : Soutien de crue

Il s'agit de lâcher du barrage un débit suffisant pour produire à Bakel dans les jours suivants, un débit supérieur ou égal à un hydrogramme objectif de crue $Q_c(t)$ prédéfini. La décision de soutien de crue est prise une fois par an à une date prédéfinie T_c .

- Si la cote du lac à la date T_c est supérieure à un seuil H_s prédéfini, et si un hydrogramme de crue jugé suffisant n'a pas encore été observé dans l'année à Bakel, le soutien de crue est déclenché. La consigne est alors prise en compte pendant toute la durée nécessaire à la réalisation de l'hydrogramme $Q_c(t)$ à Bakel.
- Dans le cas contraire, la consigne de soutien de crue n'est plus prise en compte jusqu'à l'année suivante. Autrement dit, l'eau qui aurait dû être lâchée cette année là aux seules fins du soutien de crue est stockée dans la retenue.

Le débit minimal à lâcher pour le soutien de crue est calculé à partir des débits observés dans les affluents non contrôlés Bakoye et Falémé, ainsi que dans le Sénégal à Kayes et Bakel.

A5 : Soutien immédiat des basses eaux

Il s'agit de lâcher du barrage un débit suffisant pour produire à Bakel dans les jours suivants, un débit supérieur ou égal à un hydrogramme objectif d'étiage $Q_{et}(t)$ prédéfini. Cet hydrogramme correspond au débit nécessaire pour la satisfaction de certains besoins. Deux consignes de ce type peuvent être prises en compte en même temps :

- La première vise à satisfaire des besoins sommables de consommation d'eau : irrigation, alimentation humaine. L'hydrogramme objectif doit alors être défini comme la somme de ces besoins, augmentée des pertes accompagnant le transit des débits jusqu'au lieu de la consommation, et encore augmentés d'un éventuel débit résiduel de sécurité.
- La deuxième vise à garantir un débit suffisant pour permettre la navigation (passage des seuils) à certains moments de l'année.

Le débit minimal à lâcher pour le soutien d'étiage est calculé suivant le même principe que pour le soutien de crue.

A6 : Conservation d'une revanche suffisante pour le laminage futur des crues

Il s'agit de lâcher un volume suffisant du barrage pour conserver une revanche (volume libre dans la retenue) permettant de laminar les crues futures au palier de débit souhaité avec un taux de réussite probable prédéfini. Cette revanche nécessaire, qui correspond à une cote limite maximale du niveau dans le lac, est variable dans l'année.

Le débit minimal à lâcher pour conserver la revanche souhaitée, est calculé en fonction de la cote du lac et du débit entrant dans la retenue

1.1.4.2. Consignes définissant une limite maximale pour le débit lâché

B2 : Laminage immédiat des crues

Deux types de laminage des crues peuvent être envisagés :

- Le laminage immédiat des crues à la sortie du barrage consiste à lâcher un débit total Q_t inférieur ou égal à un certain débit limite Q_{l1} prédéfini.
- Le laminage des crues au niveau de Bakel consiste à lâcher un débit Q_t suffisamment faible pour que le débit des jours suivants à Bakel ne dépasse pas une limite Q_{l2} prédéfinie. Dans ce cas, le débit maximal à lâcher est calculé en fonction des débits observés sur le Bakoye et la Falémé, et sur le Sénégal à Kayes et Bakel.

B3 : Conservation d'un stock d'eau suffisant pour le soutien d'étiage futur

Il s'agit de limiter le débit total lâché du barrage afin de conserver le stock nécessaire (dans la tranche utile des cotes supérieures à $H_{min}=187m$) pour pouvoir satisfaire le soutien d'étiage futur avec un taux de réussite probable prédéfini. Ce stock nécessaire, qui correspond à une cote limite minimale du niveau dans le lac, est variable dans l'année.

Le débit maximal à lâcher pour conserver le stock souhaité, est calculé en fonction de la cote du lac et du débit entrant dans la retenue

1.1.5 CALCUL DU DEBIT A LACHER PAR LES ORGANES D'EVACUATION

Le calcul est fait dans l'optique de lâcher le débit minimal permettant de respecter le plus grand nombre possible des consignes qui auront été préalablement définies et classées par ordre de priorité.

Tout d'abord, la fourchette de débit qu'il est physiquement possible d'évacuer de l'ouvrage, est déterminée à partir des contraintes de gestion. Elle se resserre ensuite en fonction des limites minimales ou maximales de débit à lâcher, imposées par les consignes de sécurité puis par celles de gestion. Le processus s'arrête lorsque toutes les consignes envisagées ont été prises en compte par ordre de priorité décroissante, 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, et la plus proche possible du débit demandé par la consigne incompatible. C'est finalement la borne inférieure de la fourchette résultante qui détermine le débit total à lâcher du barrage.

La répartition de ce dernier entre les différents organes d'évacuation (turbines, vannes de surface et vannes de demi fond) est faite de façon à produire le maximum de puissance pouvant être absorbée sur le réseau, et à respecter l'ouverture minimale des vannes de surface imposée par les contraintes de gestion.

1.2. DETAIL DES PROCEDURES DE GESTION OPERATIONNELLE

Le chapitre 2 du manuel provisoire de gestion donne le détail des procédures de calcul dont la plupart seront automatisées dans la version définitive du logiciel PROGEMAN.

1.2.1. SITUATION HYDROLOGIQUE : PREPARATION DE LA BANQUE DE DONNEES

Le calcul des débits à lâcher utilise les valeurs moyennes journalières des données décrivant la situation hydrologique. Il est précédé des opérations suivantes :

- Saisie des dernières valeurs connues pour mettre à jour les fichiers de données décrivant la situation hydrologique : cotes aux stations hydrométriques et dans la retenue, et taux d'évaporation éventuellement.
- Traduction des cotes en débits instantanés aux stations hydrométriques.
- Calcul de débits moyens journaliers à partir des valeurs instantanées, par la méthode des trapèzes
- Reconstitution éventuelle de données manquantes, mais surtout extension de données par modèles autorégressifs, de propagation ou de tarissement, voire par utilisation de valeurs médianes. Ces traitements concernent à la fois les stations réelles et certaines stations fictives, indispensables au calcul.

Dans le manuel provisoire figurent toutes les valeurs numériques nécessaires concernant l'étalonnage des stations hydrométriques (traduction des cotes en débits) et les différents modèles, ainsi que les valeurs médianes de débit à utiliser en dernier ressort.

1.2.2. CALCUL DES LIMITES MINIMALES ET MAXIMALES DE DEBIT LACHE, LIEES AUX CONTRAINTES DE GESTION

Les valeurs limites du débit qu'il est physiquement possible de lâcher de Manantali, sont directement liées au niveau du plan d'eau de la retenue. Ces relations sont données dans le manuel provisoire.

1.2.3. CALCUL DES LIMITES MINIMALES ET MAXIMALES DE DEBIT LACHE, IMPOSEES PAR LES CONSIGNES DE SECURITE ET LES CONSIGNES DE GESTION

1.2.3.1. Calcul du débit lâché donnant à Bakel un débit prédéfini pour les jours suivants

Ce calcul qui concerne les consignes A4, A5 et B2, repose sur les modèles de propagation établis entre Manantali, Oualia et Kayes d'une part, et Kayes, Gourbassy et Bakel d'autre part. Il inclut une procédure de régulation qui consiste à effectuer une correction en boucle fermée, en comparant en permanence les débits obtenus à Kayes et Bakel avec ceux qui pouvaient être prévus à partir des

seuls modèles de propagation. Les données utilisées sont les débits du Bakoye et de la Falémé (observés et prévus), ainsi que les débits observés à Kayes et Bakel.

1.2.3.2. Calcul du débit lâché amenant le niveau du lac à une valeur prédéfinie au bout de 24 heures

Ce calcul qui concerne les consignes A6, B1 et B3, repose sur un simple bilan de volume qui prend en compte les courbes de remplissage de la retenue (relations cote—surface et cote—volume). Les données utilisées sont la cote du plan d'eau, le débit entrant (observé) dans la retenue et le taux d'évaporation.

1.2.3.3. Calcul du débit lâché minimal permettant d'éviter la submersion des digues du barrage

Ce calcul qui concerne la consigne A1 repose sur un bilan de volume basé sur la cote du plan d'eau, le débit entrant (observé et prévu) dans la retenue, et le taux d'évaporation. Il vise à maintenir la cote du lac en dessous de 210,50 m, tout en limitant le débit maximal lâché du barrage le jour même et les jours suivants (jusqu'au jour le plus éloigné pour lequel on dispose d'une prévision des débits entrants).

1.2.3.4. Calcul du débit lâché minimal relatif à la consigne de production d'énergie :

1^{er} cas : la cote du plan d'eau est inférieure à S1

La demande de production électrique n'est alors pas prise en compte pour déterminer le débit total à lâcher.

2^{ème} cas : la cote du plan d'eau est comprise entre S1 et S2

On vise alors à produire une puissance $P = \min(P_o, P_{max})$, où P_{max} représente le maximum productible (croissant en fonction du niveau du plan d'eau) et P_o la puissance demandée.

Le manuel provisoire donne les abaques nécessaires pour déterminer en fonction du niveau du plan d'eau, la puissance maximale productible P_{max} ainsi que le débit total minimal lâché du barrage permettant de produire la puissance P .

3^{ème} cas : la cote du plan d'eau est supérieure à S2

On vise alors à produire la puissance maximale productible P_{max} . Le débit minimal à lâcher est donné par les abaques mentionnées ci-dessus.

1.2.4 DETERMINATION DU DEBIT A LACHER PAR LES DIFFERENTS ORGANES D'EVACUATION

Tout d'abord, le débit total à lâcher du barrage est calculé en combinant les limites minimales et maximales déterminées plus haut, en prenant d'abord en compte celles qui sont imposées par les contraintes de gestion, puis par les consignes de sécurité, et enfin par les consignes de gestion classées par ordre de priorité décroissante. Le processus de combinaison de ces valeurs limites est détaillé dans le manuel provisoire.

Ensuite, la puissance maximale qu'il est possible de produire est déterminée en fonction du débit total à lâcher et du niveau du plan d'eau (abaque fourni dans le manuel provisoire). C'est cette puissance qui va devoir être produite, sauf si elle est supérieure à la puissance maximale que le réseau peut absorber, auquel cas c'est cette dernière qui sera produite.

En fonction de la puissance qui doit être produite, du niveau du plan d'eau et du débit total à lâcher, il est alors possible de déterminer le débit à turbiner.

Le débit à lâcher par le déversoir de crue doit être fixé supérieur ou égal au débit minimal imposé par les contraintes de gestion, qui correspond à l'ouverture minimale de sécurité de l'évacuateur de crue.

Enfin, le débit à lâcher par les vannes de demi-fond doit être égal au débit total à lâcher, diminué du débit à turbiner et du débit à déverser.

1.3. SIMULATION NUMERIQUE

Sur la base des débits naturels observés de 1950 à 1998 sur le haut bassin du Sénégal, la gestion de Manantali a été simulée numériquement en considérant un jeu de consignes type, pour lequel 162 scénarios ont été testés en faisant varier certains paramètres.

1.3.1. CONSIGNES DE GESTION RETENUES

Les scénarios testés envisagent une puissance installée de 205 Mw au barrage, et sont basés sur les consignes suivantes, listées par ordre de priorité décroissante :

- A1 : Précaution contre la submersion des digues du barrage, en maintenant le niveau du plan d'eau en dessous de la cote 210,50 m
- A3 : lâcher d'un débit sanitaire réservé de 10 m³/s
- B1 : précaution contre l'affouillement de la partie basse du parement amont de l'ouvrage, en maintenant le niveau du plan d'eau au dessus de la cote 187 m.
- B2 : laminage immédiat des crues du Sénégal à Bakel, avec un débit journalier limité à 4500 m³/s
- A6 : conservation d'une revanche suffisante dans la retenue, pour pouvoir assurer le laminage futur des crues du Sénégal à Bakel en dessous de 4500 m³/s avec un taux de réussite de 49 années sur 50, en référence à la période 1950-1998. Le limnigramme correspondant de cote maximale à respecter dans le lac est donné dans le manuel provisoire.
- A5 : soutien des basses eaux, concernant les usages suivants : agriculture irriguée, alimentation humaine, navigabilité. Une valeur constante (de 100, 150 ou 200 m³/s) a été retenue pour le débit Q_e à assurer en permanence au niveau de Bakel.
- B3 : conservation d'un stock d'eau suffisant dans la retenue pour permettre le soutien futur de basses eaux. Le débit objectif Q_e envisagé est le même que dans la consigne A5, et le taux de réussite retenu est de 24 années sur 25 sur la période 1950-1998. Le limnigramme correspondant de cote minimale à respecter dans le lac est donné dans le manuel provisoire.
- A2 : production d'énergie électrique

La consigne de production d'énergie est prise en compte seulement lorsque la cote du lac se situe au dessus du seuil S1, pour lequel trois valeurs ont été testées : 187, 192 et 197 m

La consigne vise à produire la puissance maximale productible P_{max} lorsque la cote du lac se situe au dessus du seuil S2, pour lequel deux valeurs ont été testées : 202 et 206 m.

Enfin, quand la cote du lac se situe entre S1 et S2, la consigne vise à produire une puissance $P = \min(P_o ; P_{max})$ où P_o désigne une puissance constante pour laquelle trois valeurs ont été testées : 70, 90 et 110 mw.

- A4 : soutien de crue

L'hydrogramme objectif de crue retenu pour Bakel, dénommé "ORSTOM1", est le suivant :

0 m³/s le 22 août ; 2500 m³/s le 28 août ; 2500 m³/s le 2 septembre ; 0 m³/s le 16 octobre.

Le soutien de crue est déclenché à la date T_c du 20 août, si et seulement si la cote du lac se situe au dessus du seuil H_s , pour lequel trois valeurs ont été testées : 192, 195 et 198 m.

Il est supposé dans toutes les simulations effectuées, que la puissance électrique qui peut être absorbée sur le réseau est toujours supérieure à la puissance installée au barrage. Enfin, la retenue est supposée pleine ($H=208,05m$) au début de chaque calcul, le 1^{er} janvier 1950.

1.3.2. RESULTATS OBTENUS

L'analyse des résultats porte sur les points suivants :

- Energie moyenne produite par année : W1 (1950-1998) et W2 (1970-1998).
- Nss : nombre d'années pendant lesquelles la crue, non soutenue, a présenté un hydrogramme (même éventuellement décalé) inférieur à l'hydrogramme objectif ORSTOM1.
- Nsi : nombre d'années pendant lesquelles un soutien de crue a été effectué de façon incomplète, avec un arrêt provoquant un grave déficit d'écoulement à Bakel pour des débits objectifs supérieurs à 1000 m³/s .
- R : pourcentage d'années présentant une crue insuffisante, évalué sur la période 1950-1998. Il s'agit en fait des années appartenant à l'une des deux catégories précédentes.
- nombre de jours N10, N25 et N50 comptabilisés sur la période 1950-1998 (17896 jours), pendant lesquels un déficit supérieur à 10%, 25% ou 50% a été constaté à Bakel par rapport au débit objectif de basses eaux.
- Le nombre d'années pendant lesquelles un déficit d'écoulement a été constaté à Bakel, par rapport au débit objectif de basses eaux.

1.3.2.1. Défaillances obtenues pour le soutien de basses eaux

Le fait de placer la consigne B3 de préservation de stock, avant les consignes entraînant de forts lâchés (A2 pour l'énergie, et A4 pour le soutien de crue), permet toujours d'obtenir un taux de réussite élevé pour le soutien d'étiage, dans la gamme de débit envisagée de 100 à 200 m³/s. Pour aucun des scénarios testés, les défaillances journalières supérieures à 25 ou 50 % du débit objectif de basses eaux, ne se produisent plus de 0,6% et 0,5% du temps respectivement.

1.3.2.2. Fréquence des faibles crues obtenues

On constate sur l'ensemble des scénarios testés, que le pourcentage de crues trop faibles (non soutenues ou soutenues de façon trop incomplète) augmente avec la puissance P_o demandée, avec le seuil H_s conditionnant le soutien de crue et avec le débit objectif Q_e de basses eaux. Il diminue par contre avec le seuil S1 permettant de prendre en compte la demande de production d'énergie, et avec le seuil S2 entraînant la demande de production de puissance maximale turbinable. Ceci confirme l'antagonisme du soutien de crue avec le soutien d'étiage et la production d'énergie.

Sur l'ensemble des scénarios testés, la proportion des années à crue trop faible se répartit entre 6% et 61%, alors qu'elle peut être évaluée à 31% en régime naturel sur la même période.

1.3.2.3. Energie moyenne produite par année

En moyenne sur l'ensemble des 162 scénarios testés, l'énergie moyenne produite par année (W1) augmente avec la puissance P_o demandée, avec le seuil H_s conditionnant le soutien de crue et avec le débit objectif Q_e de basses eaux. Elle diminue par contre avec les seuils S1 et S2 permettant respectivement de prendre en compte la demande de production d'énergie et de demander la production de la puissance maximale turbinable. Elle augmente enfin avec le pourcentage R des crues trop faibles obtenues.

1.3.2.4. Scénarios de gestion optimaux

Du fait qu'ils donnent tous de bons résultats concernant le soutien des basses eaux, les scénarios testés se différencient surtout par l'énergie moyenne produite par année (W1) qu'ils permettent d'obtenir, et le taux R de crues trop faibles qu'ils provoquent. Les scénarios optimaux sont ceux qui, pour un débit Q_e soutenu en étiage et une énergie moyenne produite par année (W1) donnés, permettent d'obtenir les plus petites fréquences R de crues trop

faibles. Les résultats obtenus pour ces scénarios optimaux sont donnés dans le tableau 1 et représentés sur la figure 1.

Dans l'hypothèse où les années à venir montreront une hydraulicité comparable à celle de la période 1950-1998 sur le haut bassin du Sénégal, ces résultats peuvent guider le choix de stratégie de gestion qui devra être fait par l'OMVS. La figure 1 montre en effet les meilleures combinaisons qu'il est possible d'envisager pour Manantali, en terme d'objectifs de soutien de crue, soutien d'étiage et production d'énergie.

Une fois que la stratégie de gestion sera définie, il sera possible de se référer au tableau 1 pour déterminer les paramètres de gestion permettant d'atteindre le dosage désiré entre ces objectifs.

paramètres définissant les consignes de gestion					énergie moyenne produite par année (Gw h)		fréquence des crues trop faibles
Qe	Hs	Po	S1	S2	W1	W2	R
(m ³ /s)	(m)	(Mw)	(m)	(m)	(50-98)	(70-98)	(%)
100	192	70	197	206	768	588	6
100	192	110	197	202	837	582	8
100	195	90	197	202	850	612	12
100	195	110	197	202	858	617	14
100	198	70	197	202	887	687	18
100	198	90	197	202	903	700	22
100	198	110	197	202	911	704	24
100	195	90	192	202	936	730	39
100	195	110	192	202	948	725	45
100	198	70	192	202	955	793	47
100	198	90	192	202	973	790	55
100	198	110	192	202	987	776	59
150	198	70	197	206	820	673	20
150	195	70	197	202	875	666	24
150	195	90	197	202	891	677	27
150	198	70	197	202	906	718	31
150	198	90	197	202	933	747	35
150	198	110	197	202	957	777	41
150	195	110	192	202	971	763	49
150	198	110	192	202	982	768	55
200	195	70	197	206	843	689	31
200	198	70	192	206	868	729	33
200	192	110	197	206	884	684	35
200	198	90	197	206	895	742	37
200	192	110	197	202	900	679	39
200	198	110	197	206	931	762	41
200	195	110	197	202	935	735	43
200	198	70	197	202	948	782	45
200	198	110	197	202	966	788	49
200	195	110	192	202	968	757	51
200	198	110	192	202	979	762	61

tableau 1 : résultats obtenus pour la production d'énergie et le soutien de crue, dans le cas des scénarios de gestion optimaux

Signification des termes :

- Qe (m³/s) : débit objectif d'étiage, défini pour le Sénégal à Bakel
- Hs (m) : cote minimale de la surface libre du lac au 20 août, permettant d'engager le soutien de crue annuel.
- Po (w) : puissance électrique demandée
- S1 (m) : cote limite de la surface libre du lac, en dessous de laquelle la consigne relative à la demande de production d'énergie n'est pas prise en considération.
- S2 (m) : cote limite de la surface libre du lac, au dessus de laquelle on vise à produire la puissance maximale productible en fonction de la cote
- W1 (Gwh) : énergie moyenne produite par année sur la période 1950-1998.
- W2 (Gwh) : comme W1, mais sur la période 1970-1998
- R : fréquence des crues trop faibles obtenues

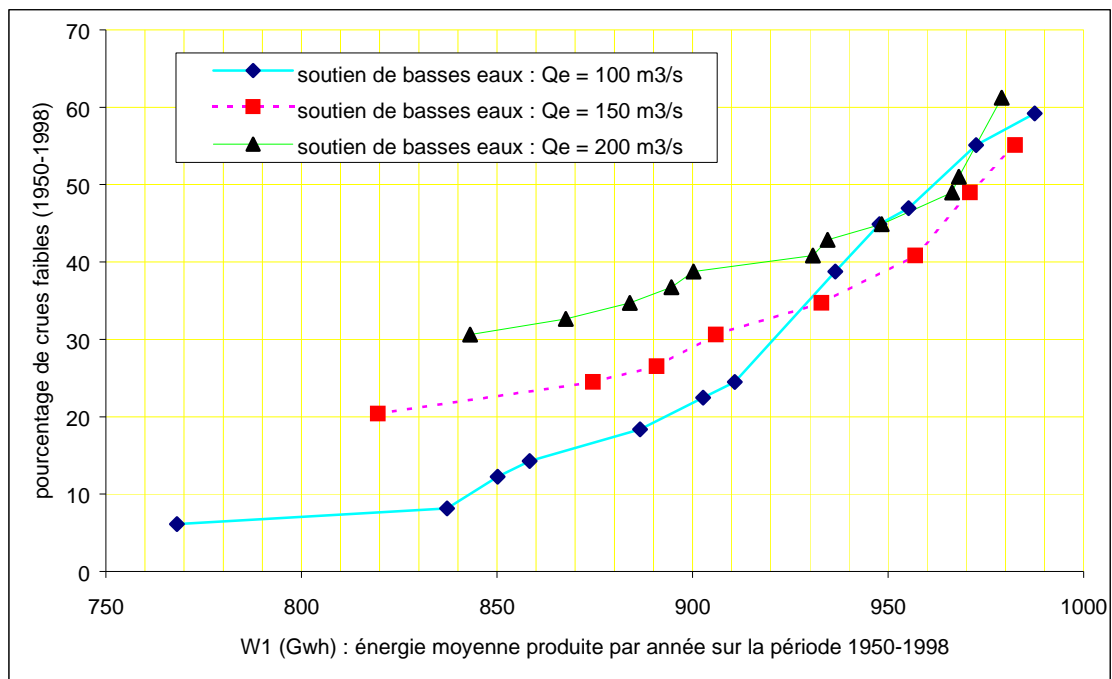


Figure 1 : relation R(W1) optimale, donnant la meilleure énergie moyenne produite par année sur la période 1950-1998, en fonction du pourcentage obtenu de crues trop faibles sur la même période.

ANNEXE 1 : MESURES DE DEBITS

Auteur : JP Lamagat

1. BAKEL

H(cm)	Q(m ³ /s)	H(cm)	Kg
30	0,00	0	0.01000
40	0,30	50	0.01000
50	0,67	100	0.01000
60	3,2	150	0.01000
80	10,7	200	0.01000
100	35,0	250	0.01000
120	61,3	300	0.01000
140	91,5	350	0.01000
160	126	400	0.00644
180	160	450	0.00418
200	198	500	0.00297
220	239	550	0.00231
240	282	564	0.00206
260	328	650	0.00150
280	380	1300	0.00150
300	435		
320	483		
340	540		
360	598		
380	658		
400	720		
450	880		
500	1048		
550	1223		
600	1407		
650	1600		
700	1805		
750	2026		
800	2265		
850	2528		
900	2820		
950	3147		
1000	3516		
1050	3936		
1100	4414		
1150	4961		
1200	5586		
1250	6301		
1300	7117		
1350	8041		
1400	9095		

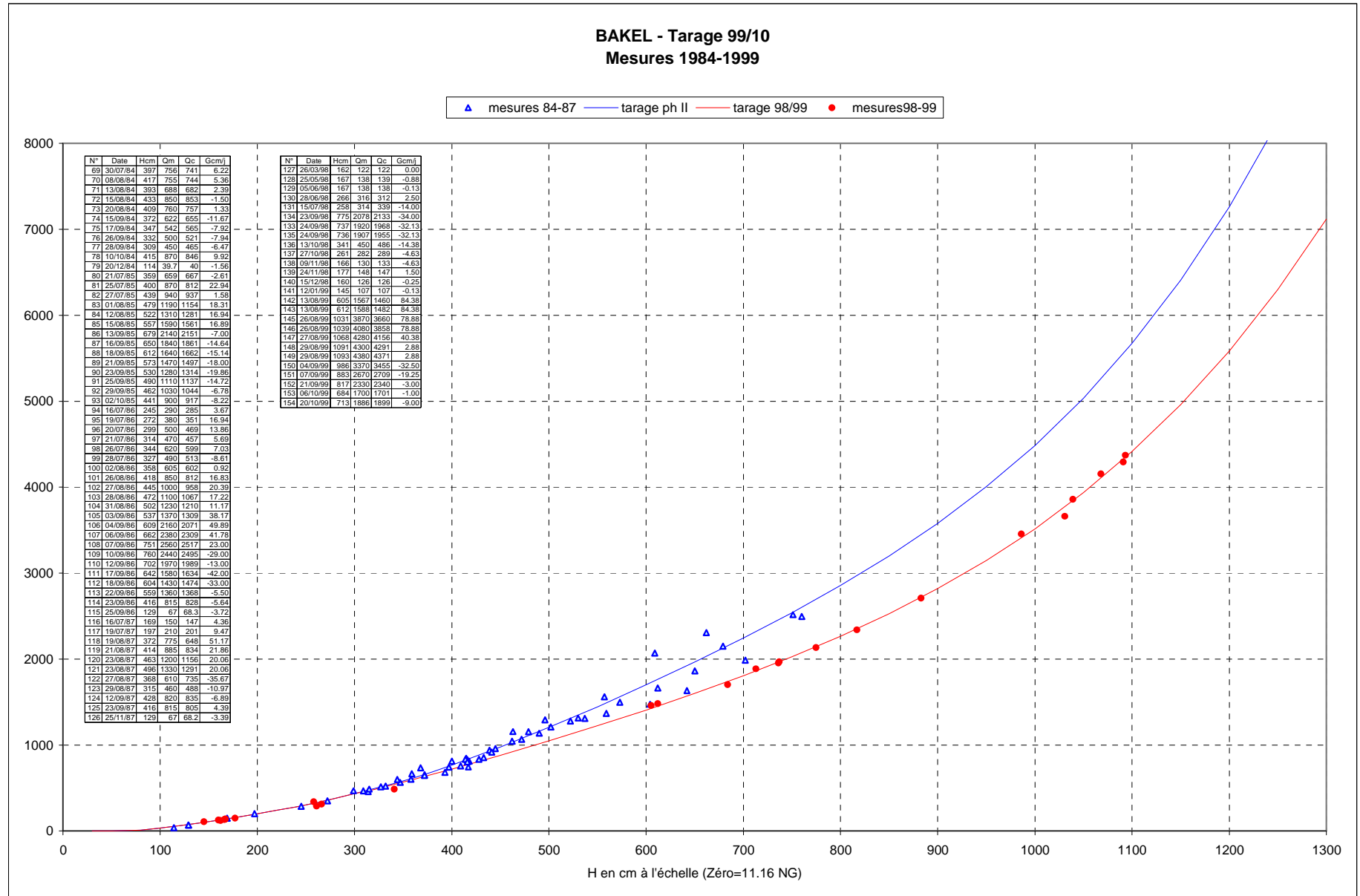
Les tableaux ci-dessous contiennent les fichiers qui régissent la transformation hauteur-débit à la station de BAKEL :

Le premier fichier donne la valeur du débit en régime permanent, le second donne la correction de ce débit en fonction de la variation de cote durant 24 heures, suivant l'équation :

$$Q=Q_0 (1+Kg*G)^{0.5}$$

- Q est le débit réel
- Q0 le débit permanent pour la cote observée
- Kg la correction de gradient
- G la variation de niveau ramenée à 24 heures au moment de l'observation à traduire.

Figure A1.1



Barème BAKEL – Correction de gradient – Période postérieure au 1^{er} juillet 1988

Hcm	Kg	Hcm	Kg	Hcm	Kg	Hcm	Kg	Hcm	Kg	Hcm	Kg	Hcm	Kg	Hcm	Kg	Hcm	Kg	Hcm	Kg
30	0.01	31	0.01	32	0.01	33	0.01	34	0.01	35	0.01	36	0.01	37	0.01	38	0.01	39	0.01
40	0.01	41	0.01	42	0.01	43	0.01	44	0.01	45	0.01	46	0.01	47	0.01	48	0.01	49	0.01
50	0.01	51	0.01	52	0.01	53	0.01	54	0.01	55	0.01	56	0.01	57	0.01	58	0.01	59	0.01
60	0.01	61	0.01	62	0.01	63	0.01	64	0.01	65	0.01	66	0.01	67	0.01	68	0.01	69	0.01
70	0.01	71	0.01	72	0.01	73	0.01	74	0.01	75	0.01	76	0.01	77	0.01	78	0.01	79	0.01
80	0.01	81	0.01	82	0.01	83	0.01	84	0.01	85	0.01	86	0.01	87	0.01	88	0.01	89	0.01
90	0.01	91	0.01	92	0.01	93	0.01	94	0.01	95	0.01	96	0.01	97	0.01	98	0.01	99	0.01
100	0.01	101	0.01	102	0.01	103	0.01	104	0.01	105	0.01	106	0.01	107	0.01	108	0.01	109	0.01
110	0.01	111	0.01	112	0.01	113	0.01	114	0.01	115	0.01	116	0.01	117	0.01	118	0.01	119	0.01
120	0.01	121	0.01	122	0.01	123	0.01	124	0.01	125	0.01	126	0.01	127	0.01	128	0.01	129	0.01
130	0.01	131	0.01	132	0.01	133	0.01	134	0.01	135	0.01	136	0.01	137	0.01	138	0.01	139	0.01
140	0.01	141	0.01	142	0.01	143	0.01	144	0.01	145	0.01	146	0.01	147	0.01	148	0.01	149	0.01
150	0.01	151	0.01	152	0.01	153	0.01	154	0.01	155	0.01	156	0.01	157	0.01	158	0.01	159	0.01
160	0.01	161	0.01	162	0.01	163	0.01	164	0.01	165	0.01	166	0.01	167	0.01	168	0.01	169	0.01
170	0.01	171	0.01	172	0.01	173	0.01	174	0.01	175	0.01	176	0.01	177	0.01	178	0.01	179	0.01
180	0.01	181	0.01	182	0.01	183	0.01	184	0.01	185	0.01	186	0.01	187	0.01	188	0.01	189	0.01
190	0.01	191	0.01	192	0.01	193	0.01	194	0.01	195	0.01	196	0.01	197	0.01	198	0.01	199	0.01
200	0.01	201	0.01	202	0.01	203	0.01	204	0.01	205	0.01	206	0.01	207	0.01	208	0.01	209	0.01
210	0.01	211	0.01	212	0.01	213	0.01	214	0.01	215	0.01	216	0.01	217	0.01	218	0.01	219	0.01
220	0.01	221	0.01	222	0.01	223	0.01	224	0.01	225	0.01	226	0.01	227	0.01	228	0.01	229	0.01
230	0.01	231	0.01	232	0.01	233	0.01	234	0.01	235	0.01	236	0.01	237	0.01	238	0.01	239	0.01
240	0.01	241	0.01	242	0.01	243	0.01	244	0.01	245	0.01	246	0.01	247	0.01	248	0.01	249	0.01
250	0.01	251	0.01	252	0.01	253	0.01	254	0.01	255	0.01	256	0.01	257	0.01	258	0.01	259	0.01
260	0.01	261	0.01	262	0.01	263	0.01	264	0.01	265	0.01	266	0.01	267	0.01	268	0.01	269	0.01
270	0.01	271	0.01	272	0.01	273	0.01	274	0.01	275	0.01	276	0.01	277	0.01	278	0.01	279	0.01
280	0.01	281	0.01	282	0.01	283	0.01	284	0.01	285	0.01	286	0.01	287	0.01	288	0.01	289	0.01
290	0.01	291	0.01	292	0.01	293	0.01	294	0.01	295	0.01	296	0.01	297	0.01	298	0.01	299	0.01
300	0.01	301	0.01	302	0.01	303	0.01	304	0.01	305	0.01	306	0.01	307	0.01	308	0.01	309	0.01
310	0.01	311	0.01	312	0.01	313	0.01	314	0.01	315	0.01	316	0.01	317	0.01	318	0.01	319	0.01
320	0.01	321	0.01	322	0.01	323	0.01	324	0.01	325	0.01	326	0.01	327	0.01	328	0.01	329	0.01
330	0.01	331	0.01	332	0.01	333	0.01	334	0.01	335	0.01	336	0.01	337	0.01	338	0.01	339	0.01
340	0.01	341	0.01	342	0.01	343	0.01	344	0.01	345	0.01	346	0.01	347	0.01	348	0.01	349	0.01
350	0.01	351	0.0099	352	0.0099	353	0.0098	354	0.0097	355	0.0096	356	0.0096	357	0.0095	358	0.0094	359	0.0094
360	0.0093	361	0.0092	362	0.0091	363	0.0091	364	0.009	365	0.0089	366	0.0089	367	0.0088	368	0.0087	369	0.0086
370	0.0086	371	0.0085	372	0.0084	373	0.0084	374	0.0083	375	0.0082	376	0.0081	377	0.0081	378	0.008	379	0.0079
380	0.0079	381	0.0078	382	0.0077	383	0.0077	384	0.0076	385	0.0075	386	0.0074	387	0.0074	388	0.0073	389	0.0072
390	0.0072	391	0.0071	392	0.007	393	0.0069	394	0.0069	395	0.0068	396	0.0067	397	0.0067	398	0.0066	399	0.0065
400	0.0064	401	0.0064	402	0.0063	403	0.0063	404	0.0063	405	0.0062	406	0.0062	407	0.0061	408	0.0061	409	0.006
410	0.006	411	0.0059	412	0.0059	413	0.0059	414	0.0058	415	0.0058	416	0.0057	417	0.0057	418	0.0056	419	0.0056
420	0.0055	421	0.0055	422	0.0054	423	0.0054	424	0.0054	425	0.0053	426	0.0053	427	0.0052	428	0.0052	429	0.0051
430	0.0051	431	0.005	432	0.005	433	0.0049	434	0.0049	435	0.0049	436	0.0048	437	0.0048	438	0.0047	439	0.0047
440	0.0046	441	0.0046	442	0.0045	443	0.0045	444	0.0045	445	0.0044	446	0.0044	447	0.0043	448	0.0043	449	0.0042
450	0.0042	451	0.0042	452	0.0041	453	0.0041	454	0.0041	455	0.0041	456	0.004	457	0.004	458	0.004	459	0.004
460	0.0039	461	0.0039	462	0.0039	463	0.0039	464	0.0038	465	0.0038	466	0.0038	467	0.0038	468	0.0037	469	0.0037
470	0.0037	471	0.0037	472	0.0036	473	0.0036	474	0.0036	475	0.0036	476	0.0036	477	0.0035	478	0.0035	479	0.0035
480	0.0035	481	0.0034	482	0.0034	483	0.0034	484	0.0034	485	0.0033	486	0.0033	487	0.0033	488	0.0033	489	0.0032
490	0.0032	491	0.0032	492	0.0032	493	0.0031	494	0.0031	495	0.0031	496	0.0031	497	0.003	498	0.003	499	0.003
500	0.003	501	0.003	502	0.0029	503	0.0029	504	0.0029	505	0.0029	506	0.0029	507	0.0029	508	0.0029	509	0.0029
510	0.0028	511	0.0028	512	0.0028	513	0.0028	514	0.0028	515	0.0028	516	0.0028	517	0.0027	518	0.0027	519	0.0027
520	0.0027	521	0.0027	522	0.0027	523	0.0027	524	0.0027	525	0.0026	526	0.0026	527	0.0026	528	0.0026	529	0.0026
530	0.0026	531	0.0026	532	0.0025	533	0.0025	534	0.0025	535	0.0025	536	0.0025	537	0.0025	538	0.0025	539	0.0025
540	0.0024	541	0.0024	542	0.0024	543	0.0024	544	0.0024	545	0.0024	546	0.0024	547	0.0023	548	0.0023	549	0.0023
550	0.0023	551	0.0023	552	0.0023	553	0.0023	554	0.0022	555	0.0022	556	0.0022	557	0.0022	558	0.0022	559	0.0021
560	0.0021	561	0.0021	562	0.0021	563	0.0021	564	0.0021	565	0.0021	566	0.002	567	0.002	568	0.002	569	0.002
570	0.002	571	0.002	572	0.002	573	0.002	574	0.002	575	0.002	576	0.002	577	0.002	578	0.002	579	0.002
580	0.002	581	0.0019	582	0.0019	583	0.0019	584	0.0019	585	0.0019	586	0.0019	587	0.0019	588	0.0019	589	0.0019
590	0.0019	591	0.0019	592	0.0019	593	0.0019	594	0.0019	595	0.0019	596	0.0019	597	0.0018	598	0.0018	599	0.0018
600	0.0018	601	0.0018	602	0.0018	603	0.0018	604	0.0018	605	0.0018	606	0.0018	607	0.0018	608	0.0018	609	0.0018
610	0.0018	611	0.0018	612	0.0017	613	0.0017	614	0.0017	615	0.0017	616	0.0017	617	0.0017	618	0.0017	619	0.0017
620	0.0017	621	0.0017	622	0.0017	623	0.0017	624	0.0017	625	0.0017	626	0.0017	627	0.0016	628	0.0016	629	0.0016
630	0.0016	631	0.0016	632	0.0016	633	0.0016	634	0.0016	635	0.0016	636	0.0016	637	0.0016	638	0.0016	639	0.0016
640	0.0016	641	0.0016	642	0.0016	643	0.0015	644	0.0015	645	0.0015	646	0.0015	647	0.0015	648	0.0015	649	0.0015
650	0.0015	651	0.0015	652	0.0015	653	0.0015	654	0.0015	655	0.0015	656	0.0015	657	0.0015	658	0.0015	659	0.0015
660	0.0015	661	0.0015	662	0.0015	663	0.0015	664	0.0015	665	0.0015	666	0.0015	667	0.0015	668	0.0015	669	0.0015
670	0.0015	671	0.0015	672	0.0015	673	0.0015	674	0.0015	675	0.0015	676	0.0015	677	0.0015	678	0.0015	679	0.0015
680	0.0015	681	0.0015	682	0.0015	683	0.0015	684	0.0015	685	0.0015	686	0.0015	687	0.0015	688	0.0015	689	0.0015
690	0.0																		

BAKEL – Etalonnage pour la période postérieure au 1^{er} juillet 1988

Hcm	Qm3/s	Hcm	Qm3/s	Hcm	Qm3/s	Hcm	Qm3/s	Hcm	Qm3/s	Hcm	Qm3/s	Hcm	Qm3/s	Hcm	Qm3/s	Hcm	Qm3/s	Hcm	Qm3/s
30	0	31	0.03	32	0.06	33	0.09	34	0.12	35	0.15	36	0.18	37	0.21	38	0.24	39	0.27
40	0.3	41	0.34	42	0.37	43	0.41	44	0.45	45	0.49	46	0.52	47	0.56	48	0.6	49	0.63
50	0.67	51	0.92	52	1.18	53	1.43	54	1.68	55	1.94	56	2.19	57	2.44	58	2.69	59	2.95
60	3.2	61	3.58	62	3.95	63	4.32	64	4.7	65	5.07	66	5.45	67	5.82	68	6.2	69	6.57
70	6.95	71	7.32	72	7.7	73	8.07	74	8.45	75	8.82	76	9.2	77	9.6	78	9.9	79	10.3
80	10.7	81	11.9	82	13.1	83	14.3	84	15.6	85	16.8	86	18	87	19.2	88	20.4	89	21.6
90	22.9	91	24.1	92	25.3	93	26.5	94	27.7	95	28.9	96	30.1	97	31.4	98	32.6	99	33.8
100	35	101	36.3	102	37.6	103	38.9	104	40.3	105	41.6	106	42.9	107	44.2	108	45.5	109	46.8
110	48.2	111	49.5	112	50.8	113	52.1	114	53.4	115	54.7	116	56	117	57.4	118	58.7	119	60
120	61.3	121	62.8	122	64.3	123	65.8	124	67.3	125	68.8	126	70.4	127	71.9	128	73.4	129	74.9
130	76.4	131	77.9	132	79.4	133	80.9	134	82.4	135	83.9	136	85.5	137	87	138	88.5	139	90
140	91.5	141	93.2	142	94.9	143	96.7	144	98.4	145	100	146	102	147	104	148	105	149	107
150	109	151	110	152	112	153	114	154	116	155	117	156	119	157	121	158	123	159	124
160	126	161	128	162	129	163	131	164	133	165	135	166	136	167	138	168	140	169	141
170	143	171	145	172	146	173	148	174	150	175	152	176	153	177	155	178	157	179	158
180	160	181	162	182	164	183	166	184	168	185	170	186	171	187	173	188	175	189	177
190	179	191	181	192	183	193	185	194	187	195	189	196	190	197	192	198	194	199	196
200	198	201	200	202	202	203	204	204	206	205	208	206	210	207	212	208	214	209	216
210	219	211	221	212	223	213	225	214	227	215	229	216	231	217	233	218	235	219	237
220	239	221	241	222	243	223	245	224	248	225	250	226	252	227	254	228	256	229	258
230	261	231	263	232	265	233	267	234	269	235	271	236	273	237	276	238	278	239	280
240	282	241	284	242	287	243	289	244	291	245	294	246	296	247	298	248	300	249	303
250	305	251	307	252	310	253	312	254	314	255	317	256	319	257	321	258	323	259	326
260	328	261	331	262	333	263	336	264	338	265	341	266	344	267	346	268	349	269	351
270	354	271	357	272	359	273	362	274	364	275	367	276	370	277	372	278	375	279	377
280	380	281	383	282	386	283	388	284	391	285	394	286	397	287	399	288	402	289	405
290	408	291	410	292	413	293	416	294	419	295	421	296	424	297	427	298	430	299	432
300	435	301	437	302	440	303	442	304	445	305	447	306	449	307	452	308	454	309	457
310	459	311	461	312	464	313	466	314	469	315	471	316	473	317	476	318	478	319	481
320	483	321	486	322	489	323	492	324	494	325	497	326	500	327	503	328	506	329	509
330	512	331	514	332	517	333	520	334	523	335	526	336	529	337	531	338	534	339	537
340	540	341	543	342	546	343	549	344	552	345	555	346	557	347	560	348	563	349	566
350	569	351	572	352	575	353	578	354	581	355	584	356	586	357	589	358	592	359	595
360	598	361	601	362	604	363	607	364	610	365	613	366	616	367	619	368	622	369	625
370	628	371	631	372	634	373	637	374	640	375	643	376	646	377	649	378	652	379	655
380	658	381	661	382	664	383	667	384	670	385	674	386	677	387	680	388	683	389	686
390	689	391	692	392	695	393	698	394	701	395	705	396	708	397	711	398	714	399	717
400	720	401	723	402	726	403	730	404	733	405	736	406	739	407	742	408	746	409	749
410	752	411	755	412	758	413	762	414	765	415	768	416	771	417	774	418	778	419	781
420	784	421	787	422	790	423	794	424	797	425	800	426	803	427	806	428	810	429	813
430	816	431	819	432	822	433	826	434	829	435	832	436	835	437	838	438	842	439	845
440	848	441	851	442	854	443	858	444	861	445	864	446	867	447	870	448	874	449	877
450	880	451	883	452	887	453	890	454	893	455	897	456	900	457	904	458	907	459	910
460	914	461	917	462	920	463	924	464	927	465	930	466	934	467	937	468	940	469	944
470	947	471	951	472	954	473	957	474	961	475	964	476	967	477	971	478	974	479	977
480	981	481	984	482	988	483	991	484	994	485	998	486	1001	487	1004	488	1008	489	1011
490	1014	491	1018	492	1021	493	1024	494	1028	495	1031	496	1035	497	1038	498	1041	499	1045
500	1048	501	1052	502	1055	503	1059	504	1062	505	1066	506	1069	507	1073	508	1076	509	1080
510	1083	511	1087	512	1090	513	1094	514	1097	515	1101	516	1104	517	1108	518	1111	519	1115
520	1118	521	1122	522	1125	523	1129	524	1132	525	1136	526	1139	527	1143	528	1146	529	1150
530	1153	531	1157	532	1160	533	1164	534	1167	535	1171	536	1174	537	1178	538	1181	539	1185
540	1188	541	1192	542	1195	543	1199	544	1202	545	1206	546	1209	547	1213	548	1216	549	1220
550	1223	551	1227	552	1230	553	1234	554	1238	555	1241	556	1245	557	1249	558	1252	559	1256
560	1260	561	1263	562	1267	563	1271	564	1275	565	1278	566	1282	567	1286	568	1289	569	1293
570	1297	571	1300	572	1304	573	1308	574	1311	575	1315	576	1319	577	1322	578	1326	579	1330
580	1333	581	1337	582	1341	583	1344	584	1348	585	1352	586	1355	587	1359	588	1363	589	1367
590	1370	591	1374	592	1378	593	1381	594	1385	595	1389	596	1392	597	1396	598	1400	599	1403
600	1407	601	1411	602	1415	603	1419	604	1422	605	1426	606	1430	607	1434	608	1438	609	1442
610	1446	611	1449	612	1453	613	1457	614	1461	615	1465	616	1469	617	1473	618	1476	619	1480
620	1484	621	1488	622	1492	623	1496	624	1500	625	1504	626	1507	627	1511	628	1515	629	1519
630	1523	631	1527	632	1531	633	1534	634	1538	635	1542	636	1546	637	1550	638	1554	639	1558
640	1561	641	1565	642	1569	643	1573	644	1577	645	1581	646	1585	647	1588	648	1592	649	1596
650	1600	651	1604	652	1608	653	1612	654	1616	655	1621	656	1625	657	1629	658	1633	659	1637
660	1641	661	1645	662	1649	663	1653	664	1657	665	1662	666	1666	667	1670	668	1674	669	1678
670	1682	671	1686	672	1690	673	1694	674	1698	675	1703	676	1707	677	1711	678	1715	679	1719
680	1723	681	1727	682	1731	683	1735	684	1739	685	1744	686	1748	687	1752	688	1756	689	1760
690	1764	691	1768	692	1772	693	1776	694	1780	695	1785	696	1789	697	1793	698	1797	699	1801
700	1805	701	1809	702	1814	703	1818	704	1823	705	1827	706	1832	707	1836	708	1840	709	1845
710	1849	711	1854	712	1858	713	1862	714	1867	715	1871	716	1876	717	1880	718	1885	719	1889
720	1893	721	1898	722	1902	723	1907	724	1911	725	1916	726	1920	727	1924	728	1929	729	1933

Tableau A1.2

BAKEL – Etalonnage pour la période postérieure au 1^{er} juillet 1988

Hcm	Qm3/s	Hcm	Qm3/s	Hcm	Qm3/s	Hcm	Qm3/s	Hcm	Qm3/s	Hcm	Qm3/s	Hcm	Qm3/s	Hcm	Qm3/s	Hcm	Qm3/s	Hcm	Qm3/s
730	1938	731	1942	732	1946	733	1951	734	1955	735	1960	736	1964	737	1969	738	1973	739	1977
740	1982	741	1986	742	1991	743	1995	744	1999	745	2004	746	2008	747	2013	748	2017	749	2022
750	2026	751	2031	752	2036	753	2040	754	2045	755	2050	756	2055	757	2059	758	2064	759	2069
760	2074	761	2079	762	2083	763	2088	764	2093	765	2098	766	2102	767	2107	768	2112	769	2117
770	2122	771	2126	772	2131	773	2136	774	2141	775	2146	776	2150	777	2155	778	2160	779	2165
780	2169	781	2174	782	2179	783	2184	784	2189	785	2193	786	2198	787	2203	788	2208	789	2212
790	2217	791	2222	792	2227	793	2232	794	2236	795	2241	796	2246	797	2251	798	2255	799	2260
800	2265	801	2270	802	2276	803	2281	804	2286	805	2291	806	2297	807	2302	808	2307	809	2312
810	2318	811	2323	812	2328	813	2333	814	2339	815	2344	816	2349	817	2354	818	2360	819	2365
820	2370	821	2375	822	2381	823	2386	824	2391	825	2397	826	2402	827	2407	828	2412	829	2418
830	2423	831	2428	832	2433	833	2439	834	2444	835	2449	836	2454	837	2460	838	2465	839	2470
840	2475	841	2481	842	2486	843	2491	844	2496	845	2502	846	2507	847	2512	848	2517	849	2523
850	2528	851	2534	852	2540	853	2546	854	2551	855	2557	856	2563	857	2569	858	2575	859	2581
860	2586	861	2592	862	2598	863	2604	864	2610	865	2616	866	2621	867	2627	868	2633	869	2639
870	2645	871	2651	872	2656	873	2662	874	2668	875	2674	876	2680	877	2686	878	2692	879	2697
880	2703	881	2709	882	2715	883	2721	884	2727	885	2732	886	2738	887	2744	888	2750	889	2756
890	2762	891	2767	892	2773	893	2779	894	2785	895	2791	896	2797	897	2802	898	2808	899	2814
900	2820	901	2827	902	2833	903	2840	904	2846	905	2853	906	2859	907	2866	908	2872	909	2879
910	2885	911	2892	912	2898	913	2905	914	2912	915	2918	916	2925	917	2931	918	2938	919	2944
920	2951	921	2957	922	2964	923	2970	924	2977	925	2984	926	2990	927	2997	928	3003	929	3010
930	3016	931	3023	932	3029	933	3036	934	3042	935	3049	936	3055	937	3062	938	3069	939	3075
940	3082	941	3088	942	3095	943	3101	944	3108	945	3114	946	3121	947	3127	948	3134	949	3140
950	3147	951	3154	952	3162	953	3169	954	3177	955	3184	956	3191	957	3199	958	3206	959	3213
960	3221	961	3228	962	3236	963	3243	964	3250	965	3258	966	3265	967	3272	968	3280	969	3287
970	3295	971	3302	972	3309	973	3317	974	3324	975	3332	976	3339	977	3346	978	3354	979	3361
980	3368	981	3376	982	3383	983	3391	984	3398	985	3405	986	3413	987	3420	988	3427	989	3435
990	3442	991	3450	992	3457	993	3464	994	3472	995	3479	996	3486	997	3494	998	3501	999	3509
1000	3516	1001	3524	1002	3533	1003	3541	1004	3550	1005	3558	1006	3566	1007	3575	1008	3583	1009	3592
1010	3600	1011	3608	1012	3617	1013	3625	1014	3634	1015	3642	1016	3650	1017	3659	1018	3667	1019	3676
1020	3684	1021	3692	1022	3701	1023	3709	1024	3718	1025	3726	1026	3734	1027	3743	1028	3751	1029	3760
1030	3768	1031	3776	1032	3785	1033	3793	1034	3802	1035	3810	1036	3818	1037	3827	1038	3835	1039	3844
1040	3852	1041	3860	1042	3869	1043	3877	1044	3886	1045	3894	1046	3902	1047	3911	1048	3919	1049	3928
1050	3936	1051	3946	1052	3955	1053	3965	1054	3974	1055	3984	1056	3993	1057	4003	1058	4012	1059	4022
1060	4032	1061	4041	1062	4051	1063	4060	1064	4070	1065	4079	1066	4089	1067	4099	1068	4108	1069	4118
1070	4127	1071	4137	1072	4146	1073	4156	1074	4165	1075	4175	1076	4185	1077	4194	1078	4204	1079	4213
1080	4223	1081	4232	1082	4242	1083	4251	1084	4261	1085	4271	1086	4280	1087	4290	1088	4299	1089	4309
1090	4318	1091	4328	1092	4338	1093	4347	1094	4357	1095	4366	1096	4376	1097	4385	1098	4395	1099	4404

Tableau A1.2 (suite)

2. KAYES

Le tableau n° A1.3 contient le résultats des mesure s effectuées entre 1963 et 1999. On note l'écart important qui existe entre les mesures effectuées jusqu'en 1985.

Il faudra vérifier pendant la décrue que l'étalonnage n'a pas été modifié. Apparemment, il semble l'avoir été, mais il peut s'agir d'un détarage qui n'est qu'apparent, les écarts étant davantage dus aux différences de méthodes de mesures qu'à une modification des paramètres de la section.

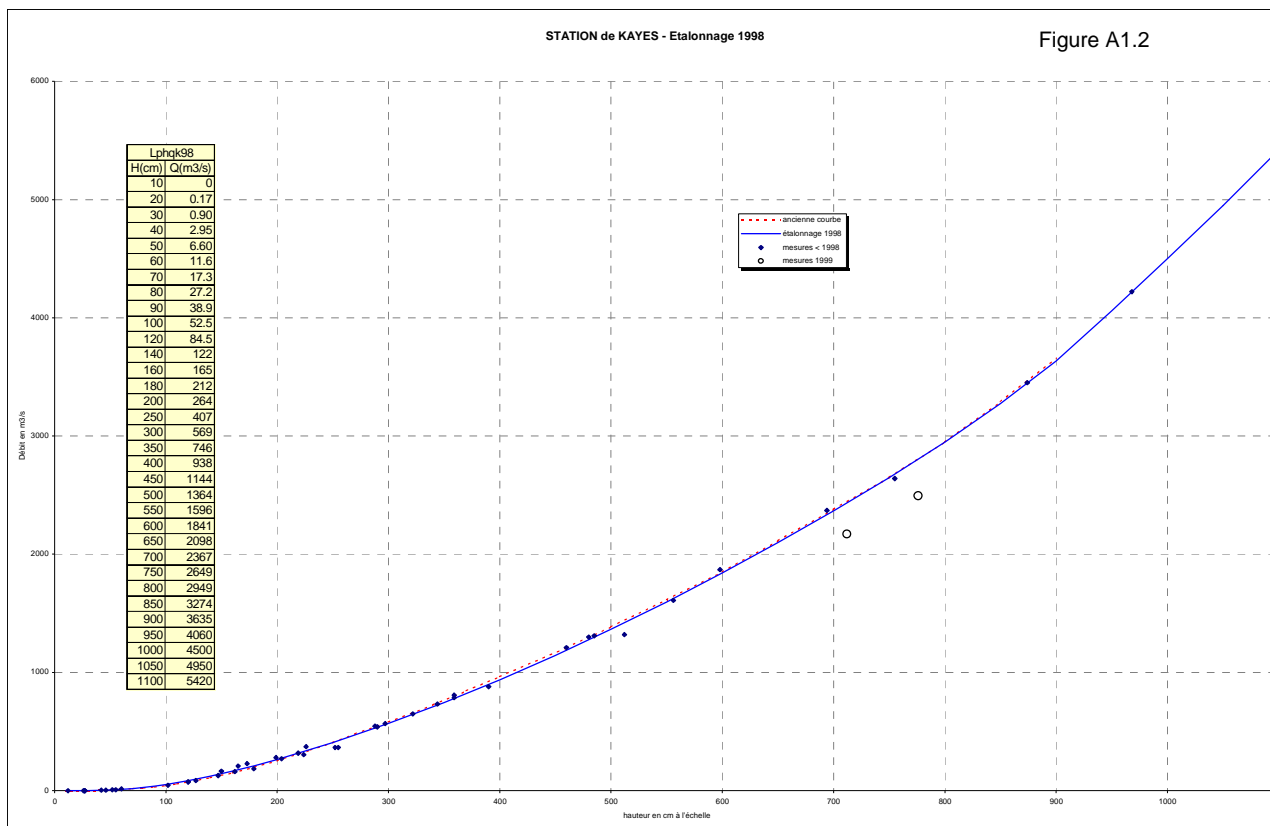
Cette remarque est d'ailleurs valable pour BAKEL, ainsi que pour GOURBASSY.

La figure n°A1.2 montre la courbe de tarage de KAYE S avec la position des deux derniers jaugeages.

La campagne 2000 doit permettre d'élucider cette question.

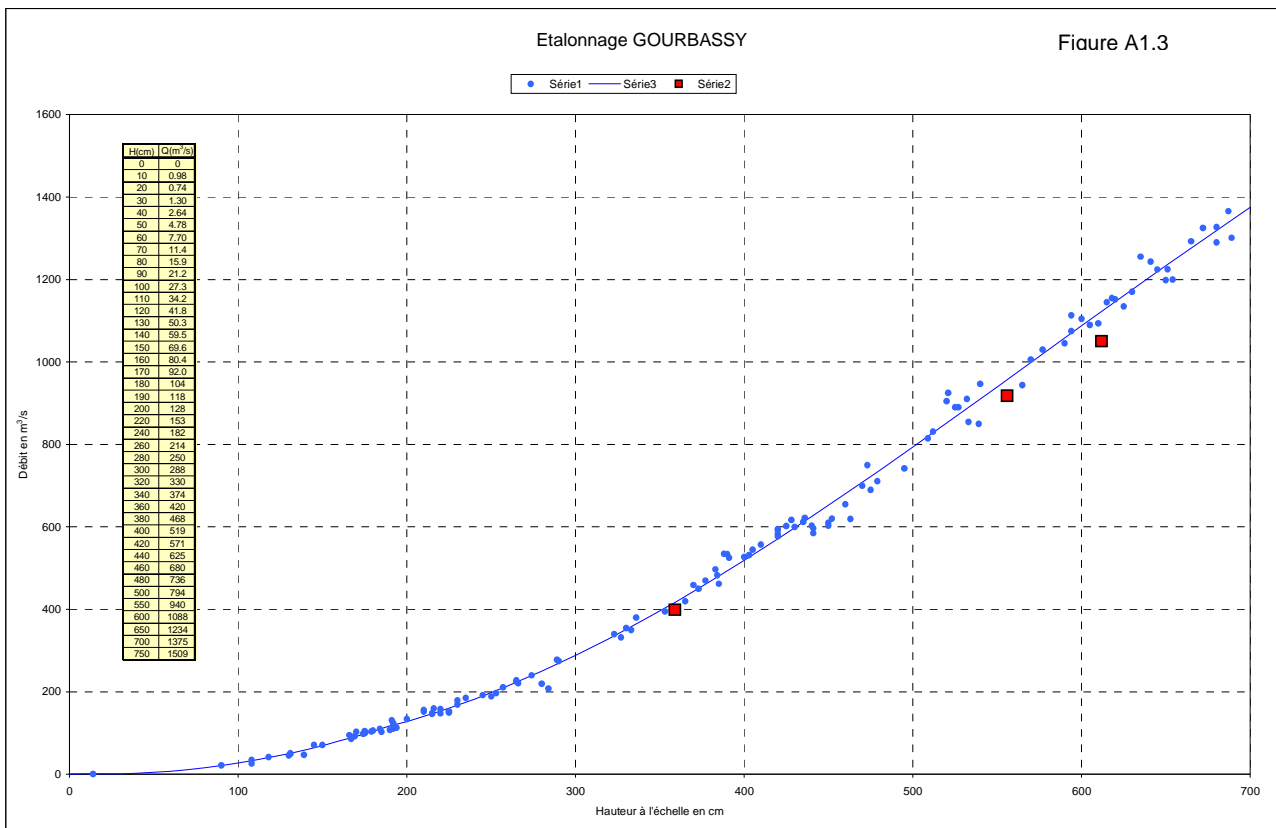
N°	Date	H(cm)	Q(m ³ /s)	N°	Date	H(cm)	Q(m ³ /s)
1	10/04/63	60	15,2	25	06/01/70	165	209
2	01/03/65	102	45,9	26	07/02/70	127	85
3	15/05/67	52	8,83	27	22/03/78	42	4,19
4	20/09/67	968	4220	28	01/06/78	26	0,55
5	29/09/67	874	3450	29	12/08/78	480	1300
6	05/10/67	755	2640	30	31/10/78	322	650
7	16/10/67	598	1870	31	03/11/78	297	567
8	06/11/67	359	787	32	11/11/78	204	271
9	29/11/67	255	365	33	01/12/78	162	161
10	23/06/68	55	8,59	34	11/09/79	460	1210
11	03/07/68	147	128	35	29/09/79	288	547
12	23/07/68	359	809	36	07/11/79	219	318
13	07/08/68	485	1310	37	16/11/79	179	186
14	11/09/68	694	2370	38	29/03/83	46	4,15
15	21/09/68	556	1610	39	11/06/83	27	0,498
16	04/10/68	390	880	40	19/05/84	27	0,577
17	06/11/68	224	305	41	10/05/85	27	0,666
18	11/11/68	120	73	42	04/06/85	12	0,078
19	07/12/68	173	229	43	30/09/85	344	733
20	20/12/68	150	166	44	07/10/85	290	539
21	14/01/69	120	75,5	45	16/10/85	252	366
22	18/10/69	512	1320	46	27/08/99	712	2170
23	06/12/69	226	373	47	28/08/99	776	2495
24	18/12/69	199	280				

Tableau A1.3



3. GOURBASSY

A Gourbassy, sur la Falémé, le problème du détarage est moins apparent. La figure A1.3 montre la position des mesures récentes par rapport à la courbe de tarage tracée en 1998.



Le problème de l'étalonnage semble être du même ordre que celui de KAYES, l'écart des mesures doit provenir beaucoup plus de la méthode que d'un détarage effectif.

ANNEXE 2

RESULTATS OBTENUS PAR SUIVI DES CUVETTES EXPERIMENTALES

auteurs : JP lamagat, P Vauchel

Introduction

Ce document reprend sous forme résumée l'ensemble des résultats obtenus sur les zones inondées de la vallée du fleuve Sénégal durant les campagnes 97-98 et 98-99. Le chapitre 1 est consacré aux résultats obtenus sur les cuvettes expérimentales, alors que le chapitre 2 est dédié aux interprétations des images SPOT.

1. Synthèse des résultats des cuvettes expérimentales

On trouvera au tableau n° 1 une présentation des niveaux maximaux et de leur dates d'occurrence pour l'ensemble des échelles de la vallée (stations hydrométriques du réseau en majuscules et échelles de crue sur les cuvettes en caractères gras), présentées de l'amont vers l'aval. La différence de niveau médiane entre les maximaux de 97 et 98 est de 86 cm. On remarque que les différences de niveau entre l'année 97 et l'année 98 sont du même ordre de grandeur sur les stations hydrométriques de base et sur les cuvettes. Cependant, deux valeurs de ces différences de niveau se distinguent pour Mbakhna et Ouôloum Néré.

A Mbakhna, cette forte différence de niveau est bien une réalité, elle provient du fait que le seuil à partir duquel se remplit la cuvette n'a pratiquement pas été dépassé en 97, alors qu'il a été largement dépassé en 98. Cela a permis en 98 un remplissage de la cuvette quasiment au niveau du fleuve, alors qu'en 98 seul le fond de la cuvette s'est rempli.

A Ouôloum Néré par contre, cette forte différence de niveau n'est pas justifiée, car la connexion entre le fleuve et la cuvette paraît excellente (cette cuvette a été la première à se remplir en 98). Les niveaux maxi en 97 et 98 ont été obtenus pour cette cuvette par nivellement des points d'arrêt des crues indiqués par les paysans après enquête. Si le point indiqué pour 98 paraît fiable (présence de délaissées de crue), il n'en va pas de même pour le point indiqué pour 97, et ce niveau maxi 97 est probablement largement sous-estimé.

Si l'on excepte les valeurs de ces deux cuvettes, l'accroissement de niveau observé en 98 dans les cuvettes n'a été que légèrement supérieur à l'accroissement de niveau observé sur le fleuve (87 cm pour les cuvettes contre 83 cm pour les stations hydrométriques du fleuve).

Tableau n°1
Dates et Niveaux maximaux aux échelles

Echelle	1997		1998		H maxi 98 - H maxi 97 (cm)
	Date Maxi	H Maxi (cm)	Date Maxi	H Maxi (cm)	
MATAM	13-sept	1328	11-sept	1437	109
Diamel / NABADJI	13-sept	1257	20-sept	1352	95
Nabadji	15-sept	1244	19-sept	1338	94
NDOULOUMADJI	16-sept	1213	20-sept	1296	83
Mbakhna	17-sept	1087	23-sept	1259	172
KAEDI	14-sept	1068	20-sept	1144	76
Ouoloum Néré	?	(866)	24-sept	1054	(188)
SALDE	17-sept	908	25-sept	999	91
NGOUI	17-sept	887	22-sept	970	83
Pété	24-sept	814	28-sept	900	86
Ouro Dialao	?	858	26-sept	926	68
Aéré Goléré	?	814	27-sept	924	110
Wawa	24-sept	557	01-oct	630	73
GUEDE	20-sept	537	30-sept	589	52
Donaye	24-sept	428	03-oct	518	90
PODOR Préfecture	24-sept	385	03-oct	460	75
Leqseïba	?	?	08-oct	418	
Podor Cuvette	30-sept	351	04-oct	439	88

Données en Italique = valeurs estimées

Le tableau n°2 montre les surfaces mises en eau et les surfaces de cultures de décrue récoltables pour les années 97-98 et 98-99. Pour les cuvettes de la Rive Gauche, les superficies ont été obtenues par levé de terrain au GPS. Pour les cuvettes de la Rive Droite, dont les tailles et l'éloignement rendent difficiles les levés de terrain, les superficies ont été obtenues par télédétection (caractères en italique). Les chiffres obtenus sont fiables pour les surfaces inondées, et comme on le verra plus loin, douteux voire fantaisistes pour les surfaces cultivées.

On notera d'abord que les accroissements de surface inondée ont été de 118% pour la Rive Gauche et de 115% pour la Rive Droite. Quant aux accroissements de surface cultivée, ils sont également très voisins sur les deux rives puisqu'ils sont de 129% pour la Rive Gauche et 130% pour la Rive Droite.

Pour les cuvettes de la Rive Gauche, le pourcentage global de surfaces récoltables par rapport aux surfaces mises en eau est de 58% en 97-98 et de 60% en 98-99 (à partir des levés GPS dans les 2 cas). Pour les cuvettes de la Rive Droite, ce pourcentage n'est que de 27% en 97-98, et de 30% en 98-99. Il faut cependant rappeler que les surfaces cultivées pour la Rive Droite ont été tirées des interprétations des images SPOT effectuées par le bureau d'études BRLi, qui est lui même extrêmement réservé sur la qualité des chiffres fournis.

Tableau n°2
Surfaces des cuvettes et des récoltes

Cuvette		97-98		98-99		Accroissement 98-99	
		Eau (ha)	Récoltes (ha)	Eau (ha)	Récoltes (ha)	Eau (ha)	Récoltes (ha)
Nabadji	RG	191	92	448	162	257	70
Mbakhna	RG	59	0	611	107	552	107
Ouoloum Néré	RD	<i>4 964</i>	<i>1 288</i>				
Pété	RG	346	268	1 485	928	1 139	660
Ouro Dialao	RD	<i>2 206</i>	<i>742</i>	<i>3 357</i>	<i>143</i>	<i>1151</i>	<i>-599</i>
Aéré Goléré	RD	<i>1 008</i>	<i>165</i>	<i>1 929</i>	<i>652</i>	<i>921</i>	<i>487</i>
Wawa	RG	1 845	<i>1 004</i>	2 520	1 325	675	321
Donaye	RG	173	8	795	429	622	421
Leqseïba	RD	<i>175</i>	<i>45</i>	<i>1 997</i>	<i>1 395</i>	<i>1 822</i>	<i>1 350</i>
Podor	RG	8 74	641	1 754	1 651	880	1 010
Total Rive Gauche		3 488	2 013	7 613	4 602	4 125	2 589
Total Rive Droite (*)		3 389	952	7 283	2 190	3 894	1 238
Total Général (*)		6 877	2 965	14 896	6 792	8 019	3 827

Données en Italique = Valeurs issues de l'interprétation des images SPOT

Les autres valeurs proviennent des contours mesurés sur le terrain au GPS

(*) Sans la cuvette de Ouoloum Néré dont les résultats manquent en 98-99

Durant la campagne 97-98, les contours des cultures de décrue levés au GPS sur les cuvettes de la Rive Gauche avaient été fournis à BRLi qui les avait utilisés comme vérité sol pour l'interprétation des surfaces cultivées au niveau de l'ensemble de la vallée. Les résultats de ces interprétations sur les cuvettes expérimentales étaient donc très comparables aux résultats des levés au GPS, et nous ne disposions pas de moyen de vérification des interprétations SPOT.

Pour la campagne 98-99, BRLi a effectué lui-même les observations au sol (mission de Mr Jacky ASTIER, Expert, du 18 mars au 1^{er} avril 99). Nous avons donc pu comparer pour les cuvettes de Rive Gauche les résultats issus des levés au GPS et de l'interprétation satellitaire. Ces résultats comparatifs sont regroupés dans le tableau n°3 ci-dessous. Ils confirment les doutes que l'on pouvait émettre dès la campagne 97-98 sur l'interprétation satellitaire des superficies en culture de décrue, dont les résultats paraissent souvent fantaisistes. On constate que l'interprétation satellitaire sous-estime (souvent fortement) les cultures de décrue, sauf pour le cas de la cuvette de Wawa où une importante superficie de végétation naturelle de fond de cuvette a été confondue avec les cultures de décrue. Il faut dire à la décharge de BRLi que pour la campagne 98-99, les images ont été prises très tardivement, alors que les cultures de décrue étaient déjà desséchées et en partie récoltées.

Tableau n°3
 Comparaison des Surfaces Cultivées estimées par GPS ou Télédétection

Cuvette	Surfaces GPS (ha)	Surfaces Télédétection (ha)
Nabadji	162	55
Mbakhna	107	16
Pété	928	187
Wawa	1325	1984
Donaye	429	168
Podor	1651	839
Total	4602	3242

2. – Synthèse des résultats issus de la télédétection (Images Spot)

Dans le cadre d'une commande de l'OMVS au bureau d'études BRLi, des séries d'images Spot ont été acquises et traitées durant les campagnes 97-98 et 98-99, et une étude réalisée par BRLi pour chaque campagne.

2.1 – Campagne 97-98

Les résultats de la campagne 97-98 ont été repris par l'IRD à partir des informations sur supports numériques fournies par BRLi. Du fait de la prise tardive des images sur la partie amont de la vallée (zone de Mbagne à Kanel), les surfaces inondées de cette zone ont été estimées à partir d'une analyse des zones de retrait de l'eau basée sur la couleur du sol. Cette analyse ne conduit en réalité qu'à une estimation assez grossière, car les traces d'humidité sur le sol ne persistent que peu de temps.

Les résultats obtenus pour la zone de Fanaye à Mbagne sont présentés au tableau n° 4, et les résultats de la zone de Mbagne à Kanel au tableau n°5. On notera pour les 2 tableaux :

- La ligne « Bras + Mares » représente d'une part les parties linéaires servant visiblement au passage de l'eau (bras), d'autre part les très petites cuvettes, de l'ordre de un ha ou moins (mares). Il peut paraître arbitraire de séparer les bras des cuvettes, dans la mesure où souvent on observe des cultures de décrue dans les bras asséchés. Cependant cette distinction nous a paru légitime, car d'une part ces cultures dans les bras ne sont pas prises en compte dans les estimations faites à partir des images Spot, et d'autre part certains bras ne s'assèchent que trop tard pour être cultivables.
- La ligne « Gayo » ne représente pas le Gayo au sens strict, mais l'axe hydraulique principal traversant l'île à Morphil et se terminant par le Gayo. Du fait du barrage de Diama, cet axe reste désormais en eau toute l'année.
- La ligne « Diamel » ne représente pas le Diamel au sens strict, mais l'axe hydraulique commençant avec le Diamel et rejoignant le Doué près de sa défluence avec le fleuve Sénégal.

Tableau n°4
 Superficies inondées pour la zone Fanaye / Mbagne en 97-98

Entité \ Date	Septembre 97	Octobre 97
Cuvettes	46394	29624
Bras + Mares	7294	3619
Sénégal	6011	5659
Doué	3655	3859
Koundi	1133	982
Ngalenka	236	244
Gayo	777	786
Total Cuvettes	46394	29647
Total Fleuves	11812	11530
Total Général	65500	44773

Tableau n°5
Superficies inondées pour la zone Mbagne / Kanel en 97-98

Entité \ Date	Septembre 97	Octobre 97
Cuvettes		9706
Zone de Retrait		21251
Bras + Mares		2272
Sénégal		5442
Diamel		1087
Cuvettes + Retraits		30957
Total Fleuves		6529
Total Général		39758

On trouvera au tableau n°6 les surfaces des cuvettes calculées pour chacune des zones, en regard des surfaces cultivées déterminées à partir des images Spot. On constate que les surfaces cultivées ont représenté environ la moitié des surfaces des cuvettes. Il faut toutefois prendre avec une certaine réserve les estimations des cultures de décrue faites à partir des images Spot. En effet dans la conclusion de son rapport, BRLi insiste sur le fait que : « **Les résultats des classifications automatiques devront être utilisés avec prudence, en particulier les superficies de cultures de décrue. Il a en effet été indiqué les difficultés rencontrées pour l'établissement de la classification correspondante, difficultés liées à une réponse peu marquée des cultures de décrue** ». Si les estimations

Tableau n°3
Résultats des mises en cultures de décrue, campagne 97-98

Zone	Surface inondée (ha)	Surface cultivée (ha)	Pourcentage de mise en culture
Fanaye à Mbagne	46 394	20 857	45%
Mbagne à Kanel	30 957	17 015	55%
Ensemble	77 351	37 872	49%

Enfin, et de manière anecdotique, on trouvera au tableau n° 4 la comparaison des superficies données dans le rapport BRLi avec les superficies calculées dans le présent rapport. On constate dans ce tableau une grosse différence inexplicable pour les résultats d'Octobre 97.

Tableau n°4
Comparaison des superficies globales BRLi et IRD

Origine	Eau Sept 97 Fanaye à Mbagne (ha)	Eau Oct 97 Fanaye à Kanel (ha)	Zone retrait Oct 97 Fanaye à Kanel (ha)	Cultures Févr 98 Fanaye à Kanel (ha)
BRLi	60 599	34 455	45 904	37 865
ORSTOM	63 321	63 278	38 699	37 873

On notera que nous avons pris pour la superficie des cultures donnée par BRLi le chiffre de 37 865 ha résultant de la somme des sous totaux du tableau des résultats finaux, et non 33 198 ha comme indiqué à tort dans ce tableau à la ligne « Total ».

ANNEXE 3

SYNTHESE DE DIVERS TRAVAUX CONCERNANT LA GESTION STRATEGIQUE ET OPERATIONNELLE DE MANANTALI ET DIAMA

Auteur : JC Bader

Ci-dessous sont brièvement résumés, dans l'ordre chronologique de leur réalisation, divers travaux effectués pendant la seconde phase du POGR, concernant directement la gestion stratégique et opérationnelle de Manantali et Diama. L'essentiel du manuel provisoire de gestion fait l'objet d'une synthèse présentée dans un chapitre différent.

REVISION DES MODELES DE PROPAGATION DE DEBIT ENTRE LES STATIONS DE MANANTALI, OUALIA KAYES, GOUBASSY ET BAKEL, SUR LE HAUT BASSIN DU FLEUVE SENEGAL

Les modèles (annexe 3.1– page A3.4) ont été recalés sur les données accumulées depuis la mise en service de Manantali (1987). Par rapport à l'ancien calage, les temps de propagation subissent assez peu de modifications. Néanmoins, il a été possible de les dissocier station par station, contrairement à l'analyse globale effectuée jusqu'alors. Les apports intermédiaires entre stations amont et aval, toujours reliés aux débits naturels de l'amont, sont nettement plus importants que ceux qui prévalaient lors de l'ancien calage. Les calculs concernant la propagation entre Kayes, Goubassy et Bakel seront repris dès que le nouvel étalonnage de Bakel sera arrêté.

NOUVEAU CALAGE DU MODELE DE COURBE DE REMOUS DU BARRAGE DE DIAMA

La note présentée en annexe 3.2 (page A3.22), donne les résultats du nouveau calage du modèle COREDIAM de courbe de remous de Diama, effectué sur les données de la période 1986-1998.

COUT EN EAU DU SOUTIEN DE CRUE DANS LE FLEUVE SENEGAL, EN FONCTION DE L'HYDRAULICITE DES MOIS D'AOUT, SEPTEMBRE ET OCTOBRE

La note présentée en annexe 3 (page A3.40) du présent rapport de synthèse, montre le grand intérêt que pourrait présenter pour la gestion de Manantali, une prévision des pluviométries mensuelles de août, septembre et octobre effectuée dès le mois de juin pour le haut bassin du fleuve Sénégal (projet Medias). Il apparaît en effet que les volumes à lâcher de Manantali pour effectuer le soutien de crue à date fixe sont fortement corrélés ($R^2 = 0,96$) avec le stock initial dans la retenue et l'hydraulicité naturelle du Sénégal à Bakel pendant le soutien, cette dernière pouvant être probablement assez bien reliée aux précipitations mensuelles. De telles prévisions devraient donc permettre de prendre la décision d'effectuer ou non le soutien de crue, non plus en fonction du stock disponible en début de soutien, mais en fonction du stock disponible probable en fin de soutien.

GESTION PRECONISEE LORSQUE LA RESERVE DISPONIBLE DANS LA RETENUE DE MANANTALI NE PERMET PAS DE SOUTENIR LA CRUE DU FLEUVE SENEGAL

La note de calcul présentée en annexe 3.4 (page A3.52) rappelle pour quelles raisons il est parfois physiquement impossible (capacité utile trop réduite en cas de succession d'années sèches), et parfois préférable (risque de diminution importante de la production électrique) de ne pas effectuer le soutien de crue. Elle démontre que lors des années où la crue n'est pas soutenue pour cause de réserve insuffisante à Manantali, on a tout intérêt à stocker l'eau qui aurait été nécessaire pour le soutien, plutôt qu'à laisser passer la crue naturelle comme il avait été un moment proposé.

NOTE SUR LE SOUTIEN DE CRUE A DATE FIXE SUR LE FLEUVE SENEGAL

Cette note présentée en annexe 3.5 (page A3.58) envisage un hydrogramme objectif de crue de type "ORSTOM1" (très proche de "GIBB A") à Bakel, dont le coût en eau dépensé à Manantali est analysé sur la période 1973-1997. Il est montré qu'en positionnant chaque année l'hydrogramme objectif à la meilleure date possible (variable suivant les années), le volume d'eau lâché de Manantali pour le soutien de crue se situe entre 0,500 et 5,8 km³. La part non turbinable de ce volume varie quant à elle entre 0 et 3,4 km³. En fixant au 28 août le premier jour du palier de 2500 m³/s à Bakel, il est montré

que la part non turbinable du volume lâché pour le soutien (de moyenne 2,0 km³), ne dépasse sa valeur minimale optimale que de 0 à 0,496 km³ selon les années. Cette augmentation vaut en moyenne 0,157 km³. Autrement dit, le fait de soutenir systématiquement la crue à date mobile de façon optimale grâce aux meilleures prévisions de débit possibles, pourrait permettre de turbiner selon les années, de 0 à 0,496 km³ de plus (et en moyenne 0,157 km³ de plus) qu'en effectuant le soutien à date fixe avec un début de palier calé sur la date optimale du 28 août. Ce gain relativement faible, ajouté aux difficultés rencontrées pour mettre au point les prévisions nécessaires, plaide en faveur d'un soutien à date fixe optimale plutôt qu'à date mobile.

Puisqu'il n'entraîne qu'une économie d'eau relativement faible, pourquoi le soutien à date mobile semble-t-il alors offrir de meilleurs résultats que le soutien à date fixe ? La réponse tient au fait qu'il était envisagé jusqu'à présent un soutien à date fixe engagé chaque année de façon systématique, alors que les consignes envisagées pour le soutien à date mobile permettaient de renoncer au soutien de crue quand celui-ci nécessiterait une dépense en eau excessive. En acceptant de renoncer au soutien de crue certaines années, on voit donc que le soutien à date fixe devrait donner des résultats assez proches de ceux obtenus avec le soutien à date mobile. Le critère proposé pour déclencher ou non le soutien de crue fixe, devrait prendre en compte le stock d'eau disponible dans la retenue au moment du déclenchement.

GLOSSAIRE

Pour répondre aux recommandations formulées en juin 99 par le Comité de Suivi du POGR, un glossaire a été placé en annexe 3.6 (page A3.72) du présent rapport, pour expliquer quelques termes utilisés dans le manuel provisoire de gestion. Il faut souligner qu'une liste exhaustive des différentes variables utilisées dans le manuel figure dans l'annexe A de ce dernier.

PROGRAMMATION DU SOUTIEN DE CRUE DE 1998

L'annexe 1 (+addendum) du tome 2 du rapport intérimaire de 2eme phase présente une méthode de calcul qui a été utilisée en août 98 pour estimer les risques de ne pas pouvoir remplir la retenue à l'horizon du 31 décembre 2000, en fonction de l'hydrogramme objectif de crue qui serait retenu en 1998. Cette méthode est basée sur l'utilisation de SIMULSEN pour évaluer les bilans de volume, et sur l'utilisation d'un tableur (Excel) pour les combinaisons statistiques. Le logiciel SIMULSEN sera adapté au cours de la troisième phase pour pouvoir faire ce calcul de façon plus conviviale, puisque le genre de problème posé est susceptible de se présenter à nouveau.

SOUTIEN DE CRUE A DATE MOBILE OU A DATE FIXE. CONSEQUENCES PREVISIBLES SUR LE PRODUCTIBLE ENERGETIQUE DU BARRAGE DE MANANTALI

L'annexe 3 du tome 2 du rapport intérimaire de 2eme phase montre qu'il est possible d'envisager un soutien de crue à date fixe permettant d'obtenir des résultats presque aussi bons que le soutien à date mobile. Sur la base des débits observés entre 1970 et 1997, on peut obtenir la même fréquence de crues correctement soutenues, avec une perte de puissance moyenne produite s'élevant à 1, 4 Mw seulement.

Il faut noter que les résultats présentés dans cette note de calcul, tant pour le soutien de crue à date mobile qu'à date fixe, envisageaient d'utiliser pour la gestion, la totalité de la réserve située au dessus des vannes de demi-fond. Actuellement pour des raisons de protection du parement amont de l'ouvrage, il est admis de limiter la réserve utilisable à la tranche supérieure à 187 m.

GESTION DE LA CRUE DE 1998

Un bilan détaillé des écoulements de la crue de 1998 est présenté dans le tome 2 du rapport intérimaire de phase 2. Cette crue a été caractérisée par des apports intermédiaires très importants entre Manantali, Oualia, Gourbassy et Bakel. Le volume de ces apports entre le 20 août et le 20 octobre (35% du volume naturel écoulé à Bakel) s'est élevé à 5,12 km³, valeur décennale humide sur la période 1950-1998.

Ces apports ont permis de dépasser largement l'hydrogramme objectif de crue (palier à 3000 m³/s) qui avait été fixé pour Bakel en 98, tout en effectuant un stockage net de 3,03 km³ dans la retenue entre le 20 août et le 20 octobre.

CONSIGNE DE GESTION DU BARRAGE DE MANANTALI, RELATIVE AU LAMINAGE DES CRUES EXCEPTIONNELLES DE LA RIVIERE BAFING

Les consignes relatives au laminage de crue envisagées dans le manuel provisoire de gestion de Manantali, ne concernent que les crues d'importance comparable à celles qui ont été observées depuis 1950 sur le Sénégal. Pour les crues exceptionnelles, seule existe à notre connaissance une consigne d'exploitation (définie par le constructeur de l'ouvrage ?), qui préconise d'abaisser le niveau du lac à la cote 199 m "en début de crue". La note de calcul présentée en annexe D du manuel provisoire de gestion montre que le soutien d'étiage et la production d'électricité ne suffiront pas forcément dans tous les cas, pour garantir l'abaissement du lac à la cote 199 au 30 juin.

Une consigne spécifique devra donc être prévue pour garantir cette revanche dans la retenue, pour laquelle on devra au préalable préciser les points suivants :

- Quelle date entend-on précisément par "début de crue" ?
- Quel risque de crue cette consigne est-elle sensée prendre en compte ?
- Quelle programmation des lâchers faut-il envisager pendant tout l'étiage ?

Concernant ce dernier point, il est envisagé plusieurs possibilités pour garantir à partir d'une retenue pleine au 1^{er} décembre, l'abaissement jusqu'à la cote 199 au 30 juin, en utilisant une prévision des apports entrant dans la retenue par modèle de tarissement. Il est alors possible de procéder, du 1^{er} décembre au 30 juin, par lâchers à débit constant, à puissance constante produite ou à débit croissant linéairement. L'énergie produite, quasiment identique dans les trois cas, n'est inférieure que de 1,5% à l'énergie maximale théoriquement récupérable à l'aide de turbines de puissance infinie.

COMPARAISON DES CRUES NATURELLES OBTENUES DANS LE SENEGAL A BAKEL, AVEC L'HYDROGRAMME OBJECTIF "ORSTOM1"

Cette étude est présentée en annexe D du rapport publié en juillet 1999 et intitulé : "Faisabilité de la modélisation pluie-débit. Intérêt des solutions proposées. Crues naturelles et gestion". Elle analyse la fréquence naturelle des crues supérieures à l'hydrogramme objectif "ORSTOM1". Cette fréquence pourrait en effet servir de référence pour doser les objectifs assignés au barrage de Manantali, en matière de production d'énergie et de soutien de crue. On constate que sur la période 1950-1998, la crue naturelle est inférieure à l'hydrogramme objectif, 31 fois sur 100. Les années 80, très déficitaires, montrent une série de 7 années successives avec des crues inférieures à l'objectif.

REPONSES DE L'IRD AUX REMARQUES CONCERNANT LE MANUEL PROVISOIRE DE GESTION DU BARRAGE DE MANANTALI, ET LE RAPPORT INTERIMAIRE DE 2EME PHASE DU POGR

Cette note (annexe 4) apporte une réponse aux remarques écrites qui ont été transmises à l'IRD par la Direction Technique de l'OMVS, au sujet des rapports mentionnés.

LOGICIEL PROGEMAN

La version définitive du logiciel permettra de calculer les débits à lâcher du barrage en tenant compte de toutes les contraintes et consignes de gestion. La version actuelle ne tient compte que des consignes destinées à satisfaire dans l'immédiat, un objectif de débit à Bakel (soutien de crue, soutien d'étiage, laminage de crue). La procédure de régulation des débits lâchés, basée sur une correction en boucle fermée utilisant les valeurs de débit obtenues à Bakel, a été automatisée et incluse dans le logiciel avant la crue de 1999.

ANNEXE 3.1

Révision des modèles de propagation de débit entre les stations de Manantali, Oualia, Kayes, Gourbassy et Bakel, sur le haut bassin du fleuve Sénégal

Résumé et conclusion

Un nouveau calage est effectué sur la période 1987-1999 pour les deux modèles de propagation donnant respectivement les débits du Sénégal à Kayes à partir de ceux du Bafing à Manantali et du Bakoye à Oualia, et les débits du Sénégal à Bakel à partir de ceux de Kayes et de la Falémé à Gourbassy. Par rapport aux précédents calages effectués sur les périodes 1967-1971 et 1955-1985, les différences suivantes sont à noter :

- Les relations donnant les temps de propagation en fonction du débit des stations de l'amont sont désormais déterminées station par station, et non plus par groupe de deux stations. Globalement, les temps obtenus sont très cohérents avec ceux de l'ancien calage. Ils raccourcissent quand les débits augmentent.
- Le débit des apports intermédiaires estimé en fonction du débit naturel des stations de l'amont est beaucoup plus élevé que celui donné par l'ancien calage. Ce résultat se retrouve pour les deux modèles.

Le nouveau calage des modèles est testé en effectuant pour chacun d'eux, une reconstitution des débits de l'aval à partir de ceux des stations de l'amont (débits observés et débits théoriques du régime naturel). Les résultats obtenus, assez satisfaisants, ne montrent aucune erreur systématique. L'erreur quadratique moyenne de la reconstitution est dans les deux cas, faible par rapport à l'écart type des valeurs observées : 89 m³/s contre 497 m³/s pour Kayes ; 102 m³/s contre 732 m³/s pour Bakel.

1 Contexte et objectif

Parmi les objectifs assignés au barrage de Manantali, plusieurs concernent des hydrogrammes minimaux ou maximaux à respecter en aval à la station de Bakel. Les consignes correspondantes font appel à une procédure de calcul qui permet de prévoir le débit à Bakel en fonction des débits lâchés par l'ouvrage. Cette procédure repose sur deux modèles de propagation de débit mis au point par JP Lamagat en 1988. Le premier qui donne les débits du Sénégal à Kayes à partir de ceux du Bafing à Manantali et du Bakoye à Oualia, a été calé par JP Lamagat sur les données de 1967 à 1971. Le second qui donne les débits du Sénégal à Bakel à partir de ceux du Sénégal à Kayes et de la Falémé à Gourbassy, a été calé par JC Bader sur les données de 1955 à 1985.

Bien que les deux modèles de propagation soient appliqués de manière particulière pour tenir compte du caractère artificiel du régime du fleuve, on constate qu'ils tendent à sous-estimer les débits obtenus à Kayes et Bakel depuis la mise en service du barrage de Manantali. Tout en conservant le même principe de modélisation, on effectue donc ici un nouveau calage des modèles sur les données accumulées depuis 1987.

2 Données de base et ancien calage des modèles

2-1 ETALONNAGE DES STATIONS

Jusque 1983, les débits transitant à l'emplacement de l'actuel barrage de Manantali étaient contrôlés à la station de Soukoutali, réputée très bien étalonnée. Depuis 1987, les valeurs de débit lâchés du barrage sont calculées par son gestionnaire, sur la base de l'étalonnage fourni par le constructeur des différents organes d'évacuation de l'ouvrage. En 1998, des mesures de débit effectuées à l'aval immédiat du barrage ont permis de constater que l'étalonnage des vannes de fond sous-estime légèrement les débits lâchés. L'erreur ainsi commise est cependant assez faible, et des mesures

complémentaires, surtout pour les forts débits, sont de toute façon nécessaires pour pouvoir conclure définitivement. Dans tout ce qui suit, on utilise donc pour Manantali depuis 1987, les valeurs de débit lâché calculées à partir des étalonnages fournis par le constructeur.

Les valeurs de débit journalier utilisées dans ce qui suit pour les stations de Oualia, Kayes, Gourbassy et Bakel, sont déduites des cotes moyennes journalières observées à ces stations, par l'intermédiaire des étalonnages indiqués dans le **tableau 1**.

Les dernières mesures de débit effectuées à Bakel pendant la crue de 1999 semblent indiquer un détarage de cette station. La présente note ne tient pas compte de ce détarage, qui doit encore être précisé par des mesures qui seront effectuées en décrue jusqu'à la fin de l'année.

2-2 ANCIEN CALAGE DES MODELES

Le principe du modèle de propagation est le suivant, pour les stations de Kayes et Bakel :

$$Q_{kayes}(j+D1) = f(Q_{manantali}(j) + Q_{oualia}(j))$$

$$D1 = g(Q_{manantali}(j) + Q_{oualia}(j))$$

$$Q_{bakel}(j+D2) = f(Q_{kayes}(j) + Q_{gourbassy}(j))$$

$$D2 = g(Q_{kayes}(j) + Q_{gourbassy}(j))$$

Les fonctions f et g , différentes bien sûr pour Kayes et Bakel, intègrent de façon moyenne l'amortissement et le temps de parcours des ondes de crue, ainsi que les apports et pertes intermédiaires entre les stations. Si l'on néglige les effets de l'amortissement, cette formulation signifie que les apports intermédiaires entre les stations sont reliés aux débits des deux stations de l'amont :

$$\begin{aligned} Q_{intermédiaire}(j) &= Q_{aval}(j+D1) - (Q_{amont1}(j) + Q_{amont2}(j)) \\ &= f(Q_{amont1}(j)+Q_{amont2}(j)) - (Q_{amont1}(j) + Q_{amont2}(j)) \\ &= F(Q_{amont1}(j) + Q_{amont2}(j)) \end{aligned}$$

Cette relation traduit le fait qu'en régime naturel, les apports intermédiaires et les débits relevés aux stations de l'amont, résultent de causes météorologiques communes ou voisines.

L'adaptation du modèle au régime artificiel consiste simplement à relier les apports intermédiaires, non plus aux débits effectivement passés aux stations de l'amont, mais aux débits naturels théoriques de ces dernières. Ainsi, pour Kayes :

$$\begin{aligned} Q_{kayes}(j+D1) &= Q_{manantali}(j) + Q_{oualia}(j) + Q_{intermédiaire}(j) \\ &= Q_{manantali}(j) + Q_{oualia}(j) + F(Q_{manantali}_{naturel}(j)+Q_{oualia}(j)) \end{aligned}$$

Les valeurs des paramètres des deux modèles sont données dans le **tableau 2**.

3 Méthode utilisée pour la mise à jour des modèles

3-1 MODELE MANANTALI + OUALIA → KAYES

Les débits lâchés de Manantali sont souvent très différents des débits naturels entrant dans la retenue. Dans ce cas, ils apparaissent complètement déconnectés des débits transitant dans le Bakoye à Oualia et la Falémé à Gourbassy. Il devient alors possible de discerner nettement sur les hydrogrammes de Kayes et Bakel, l'origine principale de nombreuses pointes de crue. Alors que la fonction g donnant les temps de propagation jusque Kayes ne pouvait être définie que globalement en

régime naturel, on peut donc maintenant la déterminer pour chaque station de l'amont de façon individuelle.

En superposant les graphiques d'hydrogrammes de Kayes, Manantali et Oualia, on repère dans un premier temps les points caractéristiques se retrouvant sans ambiguïté à Kayes et à l'une seule des deux autres stations. Il s'agit généralement de sommets de crue ou, plus rarement, de minimums de débit ou de variations très nettes succédant à des paliers. Bien que de tels points soient moins nombreux en régime naturel, l'analyse qui porte sur la période 1967-1999 intègre néanmoins ce dernier. Les données utilisées sont uniquement des débits observés, et l'ensemble de l'analyse est effectuée au pas de temps journalier.

Depuis Manantali d'une part et Oualia d'autre part, les temps de propagation de débit jusqu'à Kayes sont ensuite déterminés à partir de ces points caractéristiques. On recherche alors pour chacune de ces deux stations amont, une relation entre débit et temps de propagation jusqu'à Kayes :

$$D_{\text{manantali}} = g(Q_{\text{manantali}})$$

$$D_{\text{oualia}} = g(Q_{\text{oualia}})$$

Dans les deux cas, on obtient une fonction g décroissante.

Sur la période 1987-1999, on fait correspondre à chaque valeur de débit $Q_{\text{manantali}}$ observé à Manantali, un débit propagé $Q_{\text{kayes}_{\text{manantali}}}$ identique jusqu'à Kayes :

$$D_{\text{manantali}}(j) = g(Q_{\text{manantali}}(j))$$

$$j_0 = j + D_{\text{manantali}}(j)$$

$$Q_{\text{kayes}_{\text{manantali}}}(j_0) = Q_{\text{manantali}}(j)$$

Du fait que le temps de propagation $D_{\text{manantali}}$ dépend du débit $Q_{\text{manantali}}$, il peut se produire des chevauchements, avec les débits de jours j_1 et j_2 arrivant le même jour j_0 à Kayes lorsqu'on a :

$$j_0 = j_1 + g(Q_{\text{manantali}}(j_1)) = j_2 + g(Q_{\text{manantali}}(j_2))$$

Dans ce cas, on conserve la valeur maximale de $Q_{\text{manantali}}(j_1)$ et $Q_{\text{manantali}}(j_2)$ pour la part de débit du jour j_0 à Kayes, issue directement de la propagation depuis Manantali :

$$Q_{\text{kayes}_{\text{manantali}}}(j_0) = \max(Q_{\text{manantali}}(j_1), Q_{\text{manantali}}(j_2))$$

Après avoir procédé pour Oualia comme pour Manantali, on peut définir pour le jour j_0 à Kayes, la part de débit issue directement de la propagation depuis Manantali et Oualia :

$$\begin{aligned} Q_{\text{kayes}_{\text{propagé}}}(j_0) &= Q_{\text{kayes}_{\text{manantali}}}(j_0) + Q_{\text{kayes}_{\text{oualia}}}(j_0) \\ &= Q_{\text{manantali}}(j) + Q_{\text{oualia}}(k) \end{aligned}$$

$$\text{avec } j_0 = j + D_{\text{manantali}}(j) = k + D_{\text{oualia}}(k)$$

Pour chaque jour j_0 où un débit $Q_{\text{kayes}_{\text{propagé}}}(j_0)$ a ainsi pu être calculé, et où l'on connaît le débit observé $Q_{\text{kayes}}(j_0)$, on détermine enfin la part d'apport intermédiaire de la façon suivante :

$$Q_{\text{interm1}}(j_0) = Q_{\text{kayes}}(j_0) - Q_{\text{kayes}_{\text{propagé}}}(j_0)$$

Selon le principe du modèle de JP Lamagat, on cherche alors à relier les apports intermédiaires à la somme des débits naturels amont de Oualia et Manantali :

$$Q_{\text{interm1}}(j_0) = F (Q_{\text{manantali}_{\text{naturel}}}(j_0) + Q_{\text{oualia}}(j_0))$$

Dans cette expression, $Q_{\text{manantali}_{\text{naturel}}}$ représente le débit naturel de Manantali. Il est préalablement reconstitué à partir des débits observés à la station de Makana située à l'entrée de la retenue, en utilisant le modèle de propagation établi en régime naturel entre les stations de Makana et Soukoutali. La relation F est déterminée par régressions linéaires appliquées par plages successives de valeurs de débit naturel amont.

3-2 MODELE KAYES + GOURBASSY → BAKEL

Les paramètres de ce modèle sont déterminés suivant le même principe que le précédent. On obtient donc dans un premier temps les temps de propagation depuis Kayes et Gourbassy jusqu'à Bakel :

$$D_{\text{kayes}} = g(Q_{\text{kayes}})$$

$$D_{\text{gourbassy}} = g(Q_{\text{gourbassy}})$$

Les débits d'apports intermédiaires entre Kayes, Gourbassy et Bakel sont ensuite reliés aux débits naturels théoriques de l'amont par :

$$Q_{\text{interm2}}(j_0) = F(Q_{\text{kayes}_{\text{naturel}}}(j_0-1) + Q_{\text{gourbassy}}(j_0-1))$$

Au préalable, les débits naturels théoriques de Kayes sont reconstitués de la façon suivante, en conservant les notations adoptées plus haut :

$$Q_{\text{kayes}_{\text{naturel}}}(j_0) = Q_{\text{kayes}}(j_0) - Q_{\text{kayes}_{\text{manantali}}}(j_0) + Q_{\text{kayes}_{\text{soukoutali}}}(j_0)$$

Dans cette expression, $Q_{\text{kayes}_{\text{soukoutali}}}$ représente la part de débit de Kayes issue directement de la propagation du débit naturel de Soukoutali. Elle est déterminée de la même façon que $Q_{\text{kayes}_{\text{manantali}}}$, en remplaçant simplement $Q_{\text{manantali}}$, série de débits observés à Manantali, par $Q_{\text{soukoutali}}$, série de débits naturels théoriques.

4 Résultats

4-1 MODELE MANANTALI + OUALIA → KAYES

4-1-1 Temps de propagation entre Manantali et Kayes

Le temps de propagation entre Manantali et Kayes a pu être évalué sur 228 points caractéristiques repérés entre 1967 et 1999. Comme le montre la **figure 1**, ces temps décroissent en fonction du débit de Manantali pour les faibles valeurs de ce dernier. Ils tendent à se stabiliser pour les forts débits. Il a donc été retenu un paramétrage de la forme suivante pour la relation $D_{\text{manantali}} = g(Q_{\text{manantali}})$:

pour $Q_{\text{manantali}} > B$: $D_{\text{manantali}} = A$

pour $Q_{\text{manantali}} < B$: $D_{\text{manantali}} = A + (C * (B - Q_{\text{manantali}}))^D$

Les valeurs des paramètres A, B, C et D ont ensuite été déterminées par la méthode des moindres carrés. On obtient finalement :

A = 1,93 jour

B = 2626 m³/s

C = 0,000420 (jour/(m³/s))^(1/18,3)

D = 18,3

Erreur quadratique moyenne de l'ajustement : 1,24 jour

4-1-2 Temps de propagation entre Oualia et Kayes

Les temps de propagation entre Oualia et Kayes ont été évalués à partir de 81 points caractéristiques sur la période 1967-1999. La relation avec le débit amont est beaucoup moins nette que pour Manantali (figure 2), avec des variations beaucoup plus réduites du temps de propagation. On constate tout de même que les plus forts temps sont obtenus pour les faibles débits, et un paramétrage identique à celui de Manantali a donc été adopté pour la relation Doualia = g(Qoualia).

L'ajustement par la méthode des moindres carrés donne les résultats suivants :

A = 1,28 jour

B = 244 m³/s

C = 0,00492 jour/(m³/s)

D = 1,00

Erreur quadratique moyenne de l'ajustement : 0,51 jour

4-1-3 Débit des apports intermédiaires entre Manantali, Oualia et Kayes

Les débits d'apports intermédiaires Q_{interm1} ont été déterminés selon le principe présenté plus haut. Les figures 3 et 4, qui donnent la répartition de Q_{interm1} en fonction de la somme des débits naturels de Manantali et Oualia, montrent que pour un même débit naturel de l'amont, les débits intermédiaires sont globalement plus élevés sur la période 1987-1999 que sur la période 1967-1982. Si l'on écarte l'hypothèse d'étalonnages erronés, cela signifie une augmentation relative de la contribution de la partie nord du bassin versant dans l'écoulement du Sénégal à Kayes.

Le tableau 3 donne l'ajustement obtenu sur les périodes 1967-1982 et 1987-1999, pour la relation $Q_{\text{interm1}} = F(Q_{\text{manantali}_{\text{naturel}}} + Q_{\text{oualia}})$.

4-2 MODELE KAYES + GOORBASSY → BAKEL

4-2-1 Temps de propagation entre Kayes et Bakel

Pour 346 points caractéristiques repérés sur la période 1960-1999, la figure 5 montre une décroissance des temps de propagation D_{kayes} entre Kayes et Bakel, en fonction des débits Q_{kayes} à Kayes. Comme pour le modèle amont, ces temps ont tendance à se stabiliser pour les forts débits. Le paramétrage adopté entre Manantali et Kayes a donc été conservé pour décrire la relation $D_{\text{kayes}} = g(Q_{\text{kayes}})$. Ainsi, on obtient les résultats suivants :

pour $Q_{\text{kayes}} > B$: $D_{\text{kayes}} = A$

pour $Q_{\text{kayes}} < B$: $D_{\text{kayes}} = A + (C * (B - Q_{\text{kayes}}))^D$

A = 1,02 jour

B = 12489 m³/s

C = 0,0000807 (jour/(m³/s))^(1/155)

D = 155

Erreur quadratique moyenne de l'ajustement : 1,06 jour

4-2-2 Temps de propagation entre Gourbassy et Bakel

L'analyse effectuée sur la période 1960-1999 n'a permis de déterminer sur les hydrogrammes de Bakel, que 20 points caractéristiques provenant sans ambiguïté d'une propagation depuis Gourbassy. En effet, la plupart des pointes de crues de Gourbassy se retrouvent à Bakel, superposées avec des crues en provenance de Kayes. Comme le montre la **figure 6**, les temps repérés pour Gourbassy ne présentent pas de relation nette avec les débits passés à Gourbassy, Une valeur moyenne de 2 jours a donc été finalement retenue pour Dgourbassy.

4-2-3 Débit des apports intermédiaires entre Kayes, Gourbassy et Bakel

Les **figures 7 et 8** montrent la répartition des débits intermédiaires $Q_{\text{interm2}}(j_0)$ en fonction de la somme des débits naturels à Kayes et Gourbassy ($Q_{\text{kayes}_{\text{naturel}}(j_0-1)+Q_{\text{gourbassy}}(j_0-1)$), sur les périodes 1967-1982 et 1987-1999 respectivement. Sur la première période, aucune relation n'apparaît distinctement. Sur la période récente, malgré une forte dispersion des points, il est possible de déterminer une relation moyenne croissante entre les deux variables. Celle-ci est donnée dans le **tableau 3**.

4-3 COMPARAISON DE L'ANCIEN ET DU NOUVEAU CALAGE DES MODELES.

L'ancien et le nouveau calage des deux modèles de propagation, sont superposés sur les **figures 9 à 12**. La principale modification apportée par le nouveau calage concerne, pour un même débit naturel amont, une augmentation sensible des apports intermédiaires. Ceci se vérifie tant sur le modèle de Kayes que sur celui de Bakel.

Les modifications concernant les temps de propagation sont assez faibles.

5 Applications.

Le premier modèle de propagation a été testé pour reconstituer les débits du Sénégal à Kayes sur la période 1987-1999, à partir des débits observés à Manantali et Oualia et des débits naturels théoriques à Manantali. Ce calcul a été fait en utilisant les relations g déterminées plus haut, qui donnent les temps de propagation jusqu'à Kayes en fonction des débits observés à Oualia et Manantali.

Le débit intermédiaire contribuant au débit du jour j_0 à Kayes a été déterminé avec la relation F déterminée plus haut, en remplaçant les débits naturels de Manantali et Oualia au jour j_0 , par ceux du jour j_0-3 . Ce remplacement n'altère la qualité des résultats que de façon insensible, avec une augmentation de 0,28 m³/s de l'erreur type. Il est par contre plus conforme à l'utilisation pratique du modèle en temps réel, pour laquelle on ne dispose d'une prévision des débits naturels que sur un horizon de temps assez limité.

Pour un total de 3578 couples de débits observés et modélisés, on obtient une erreur quadratique moyenne de 89 m³/s pour le débit reconstitué à Kayes, alors que l'écart-type des valeurs observées sur ces mêmes points s'élève à 497 m³/s.

Le deuxième modèle a été testé pour reconstituer les débits du Sénégal à Bakel sur la période 1987-1999, à partir des débits observés à Kayes et Gourbassy, et du débit naturel théorique à Kayes déterminé selon la méthode exposée plus haut. Pour un total de 3316 couples de débits observés et modélisés, on obtient une erreur quadratique moyenne de 102 m³/s, alors que l'écart-type des valeurs observées sur ces mêmes points s'élève à 732 m³/s.

Sur les figures 13 et 14 sont superposés les hydrogrammes observés et modélisés, pour Kayes et Bakel respectivement. Sur ces figures ne sont reportés que les couples [observé, modélisé] complets. On constate la qualité satisfaisante des reconstitutions, certes effectuées sur l'échantillon de points ayant servi au nouveau calage des modèles. Les figures 15 et 16 montrent qu'aucune erreur systématique ne semble affecter ces reconstitutions, les erreurs étant réparties symétriquement en valeurs positives ou négatives. La moyenne de ces erreurs de modélisation s'élève à 0,0 m³/s pour Kayes, et -5,3 m³/s pour Bakel.

Liste des variables utilisées

A,B,C,D amont	paramètres de la relation donnant le temps de propagation en fonction du débit
D1	temps de propagation global entre Manantali , Oualia et Kayes
D2	temps de propagation global entre Kayes, Gourbassy et Bakel
Dgourbassy	temps de propagation entre Gourbassy et Bakel
Dkayes	temps de propagation entre Kayes et Bakel
Dmanantali	temps de propagation entre Manantali et Kayes
Doualia	temps de propagation entre Oualia et Kayes
f	relation donnant le débit aval en fonction du débit amont
F	relation donnant le débit des apports intermédiaires en fonction du débit amont
g	relation donnant les temps de propagation en fonction des débits de l'amont
Qamont	débit à la station amont
Qaval	débit à la station aval
Qbakel	débit du Sénégal à Bakel
Qgourbassy	débit de la Falémé à Gourbassy
Qinterm1	débit des apports intermédiaires entre Manantali, Oualia et Kayes
Qinterm2	débit des apports intermédiaires entre Kayes, Gourbassy et Bakel
Qintermédiaire	débit des apports intermédiaires entre les stations amont et aval
Qkayes	débit du Sénégal à Kayes
Qkayes _{naturel}	débit du Sénégal à Kayes en régime naturel
Qkayes _{manantali}	débit propagé à l'identique, de Manantali à Kayes
Qkayes _{soukoutali}	débit propagé à l'identique en régime naturel, de Manantali à Kayes
Qkayes _{oualia}	débit propagé à l'identique, de Manantali à Oualia
Qkayes _{propagé}	part du débit à Kayes propagée à l'identique depuis Manantali et Oualia
Qmanantali	débit du Bafing à Manantali
Qmanantali _{naturel}	débit du Bafing à Manantali en régime nature
Qoualia	débit du Bakoye à Oualia
Qsoukoutali	débit naturel du Bafing à Manantali

Bakoye Oualia		Sénégal Kayes		Falémé Gourbassy		Sénégal Bakel avant 1972				Sénégal Bakel depuis 1972			
H (cm)	Q(m3/s)	H (cm)	Q(m3/s)	H (cm)	Q(m3/s)	H (cm)	Q(m3/s)	H (cm)	K (jour/cm)	H (cm)	Q(m3/s)	H (cm)	K (jour/cm)
35	0	9	0	-1	0	0	0	0	0.0150	20	0	0	0.0130
40	0	10	0	0	0	20	0	220	0.0150	30	0	350	0.0130
80	7	30	1	20	1	26	0.3	350	0.0090	50	1	400	0.0126
120	27	50	7	50	5	36	1	900	0.0050	80	11	450	0.0089
160	60	70	17	80	16	48	4	1000	0.0050	120	61	500	0.0053
200	104	90	39	120	42	56	7.1			180	160	550	0.0049
240	159	120	85	170	92	64	11			240	282	564	0.0080
280	226	160	165	240	182	72	16			320	492	650	0.0072
340	348	200	264	300	288	85	25			400	766	1300	0.0030
400	475	250	407	380	468	100	36			500	1205		
480	659	300	569	480	736	120	50.8			600	1700		
580	915	400	938	550	940	140	68			700	2244		
660	1140	500	1364	650	1234	160	88			800	2855		
760	1445	600	1841	750	1509	180	117			900	3579		
900	1919	700	2367			210	164			1000	4485		
1100	2690	900	3635			240	225			1100	5672		
		1100	5420			280	318			1200	7261		
		1150	5000			320	430			1300	9402		
		1400	6400			350	514						
						380	610						
						440	845						
						510	1130						
						590	1480						
						690	1975						
						800	2550						
						850	2815						
						900	3090						
						950	3415						
						1000	3830						
						1050	4300						
						1100	4850						
						1150	5500						
						1200	6180						
						1265	7100						
						1300	7600						

Tableau 1 : étalonnages utilisés pour la traduction des cotes en débits

$Q_{\text{manantali}}^{\text{naturel}} + Q_{\text{oualia}}$ (m3/s)	Interm1 (m3/s)	$Q_{\text{kayes}}^{\text{naturel}} + Q_{\text{gourbassy}}$ (m3/s)	Interm2 (m3/s)
0	0	0	0
381	-28	125	12
523	-2	250	25
621	-26	375	27
685	-4	500	21
1000	40	750	15
2000	207	1000	34
2500	210	1250	70
3000	365	1500	98
3500	455	1750	119
		2000	136
		2500	152
		3000	158
		4000	390
		4500	506
		5000	611
		5500	577
		6000	515

Tableau 2 : ancien calage des modèles de propagation jusque Kayes (période 1967-1971) et Bakel (période 1955-1985)

période 1967-1982		période 1987-1999		période 1987-1999	
$Q_{\text{manantali}}^{\text{naturel}} + Q_{\text{oualia}}$ (m3/s)	Interm1 (m3/s)	$Q_{\text{manantali}}^{\text{naturel}} + Q_{\text{oualia}}$ (m3/s)	Interm1 (m3/s)	$Q_{\text{kayes}}^{\text{naturel}} + Q_{\text{gourbassy}}$ (m3/s)	Interm2 (m3/s)
47	-6	0	-11.2	38.1	26.6
311	0	200	34	141.2	36.8
647	25	500	78.3	286.3	55
936	74	800	118.8	539.2	68.7
1233	95	1100	207	843.5	72.9
1652	174	1400	370	1231.4	99.9
2575	348	2000	462.3	1732.9	241.2
		3000	694	2226.9	362.3
				2703	408
				3160	568
				3653	634

Tableau 3 : nouveau calage des modèles de propagation jusque Kayes et Manantali

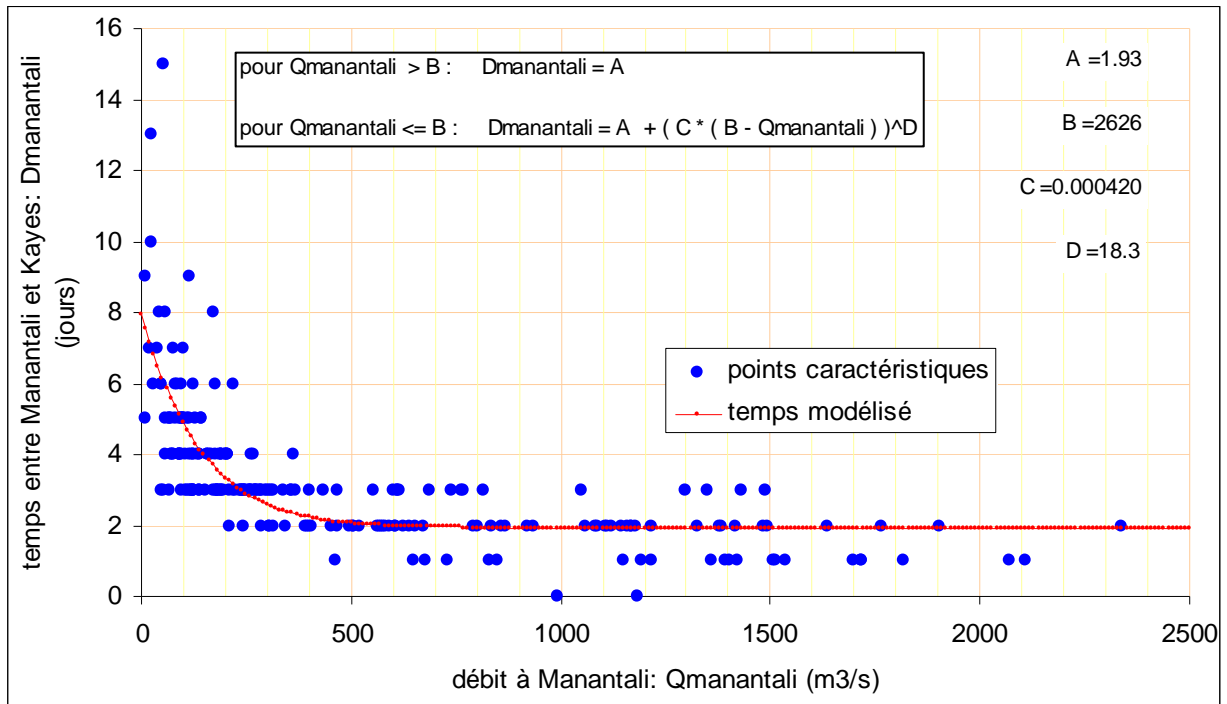


figure 1 : répartition des temps de propagation entre Manantali et Kayes, en fonction du débit de Manantali. Période 1967-1999. Nombre de points caractéristiques : 228.

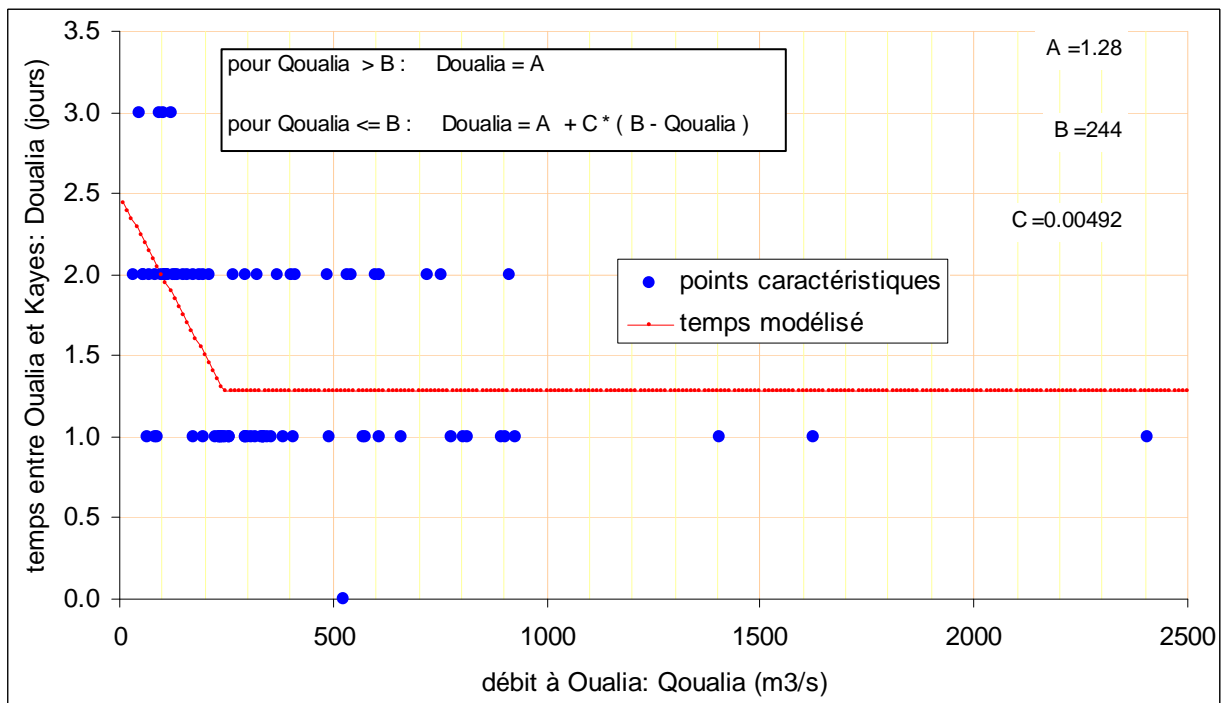


figure 2 : répartition des temps de propagation entre Oualia et Kayes, en fonction du débit de Oualia. Période 1967-1999. Nombre de points caractéristiques : 81.

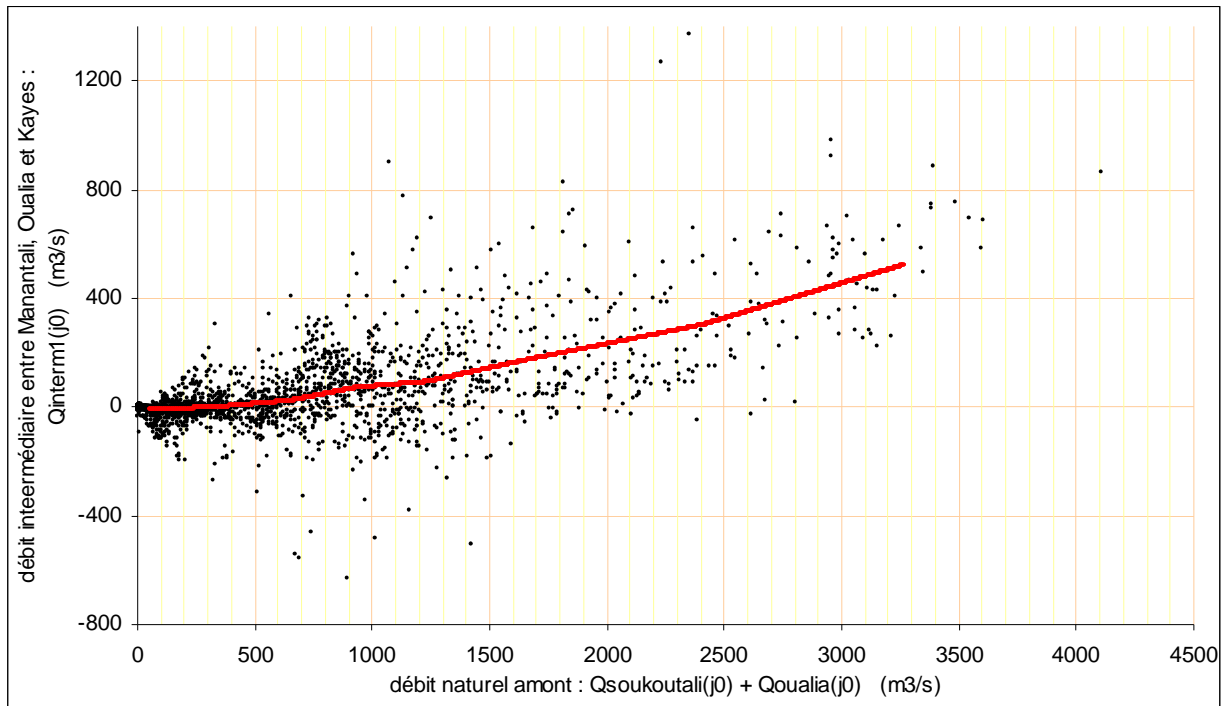


figure 3: relation entre le débit des apports intermédiaires entre Manantali, Oualia et Kayes, et la somme des débits naturels à Manantali et Oualia, sur la période 1967-1982. Nombre de points: 4308

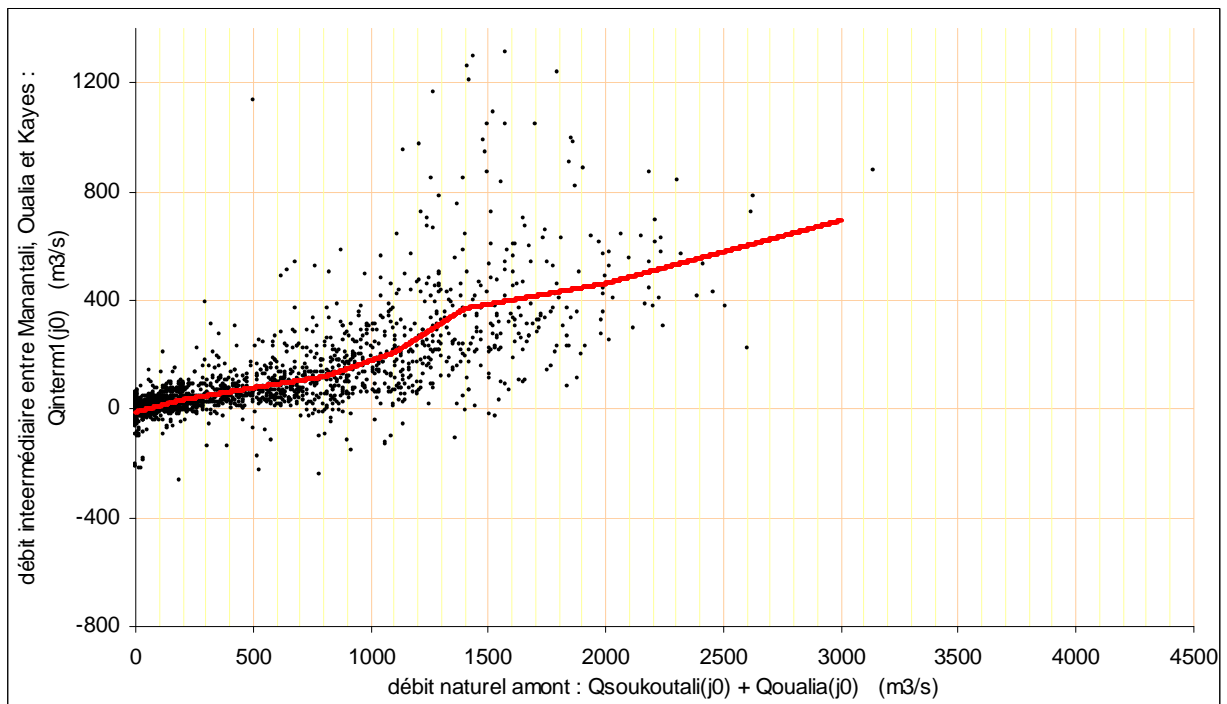


figure 4: relation entre le débit des apports intermédiaires entre Manantali, Oualia et Kayes, et la somme des débits naturels à Manantali et Oualia, sur la période 1987-1999. Nombre de points: 3571

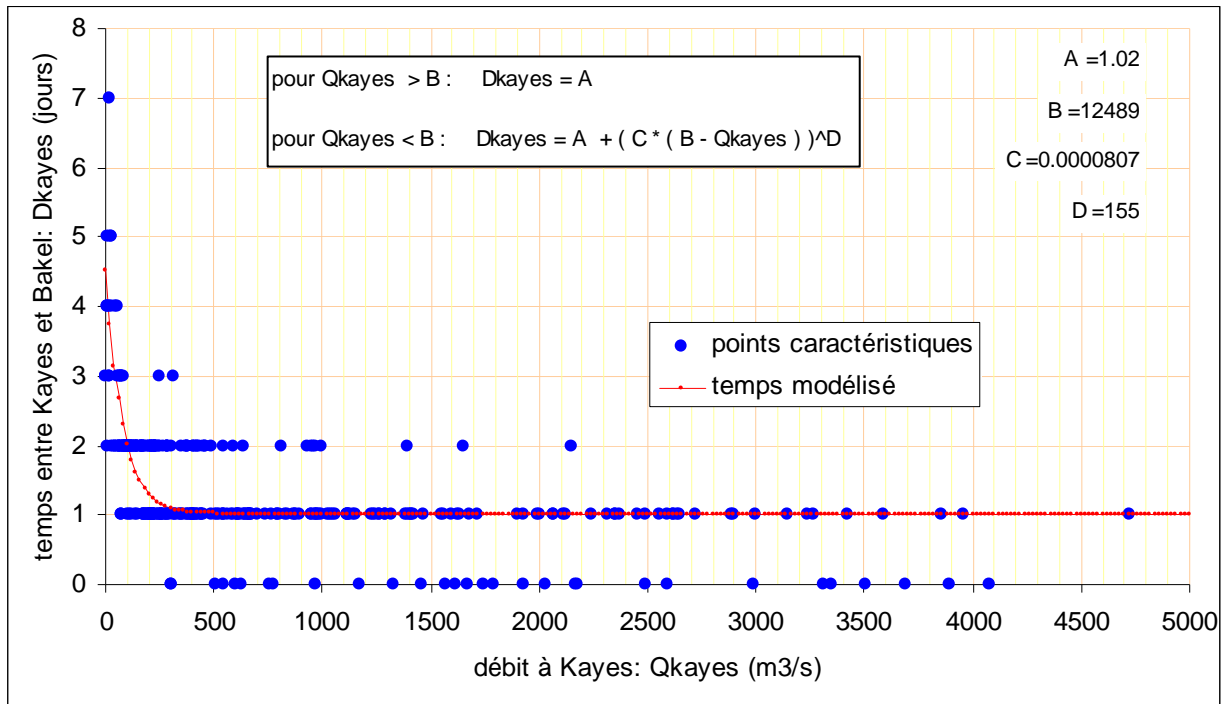


figure 5: répartition des temps de propagation entre Kayes et Bakel, en fonction du débit de Kayes. Période 1967-1999. Nombre de points caractéristiques : 346.

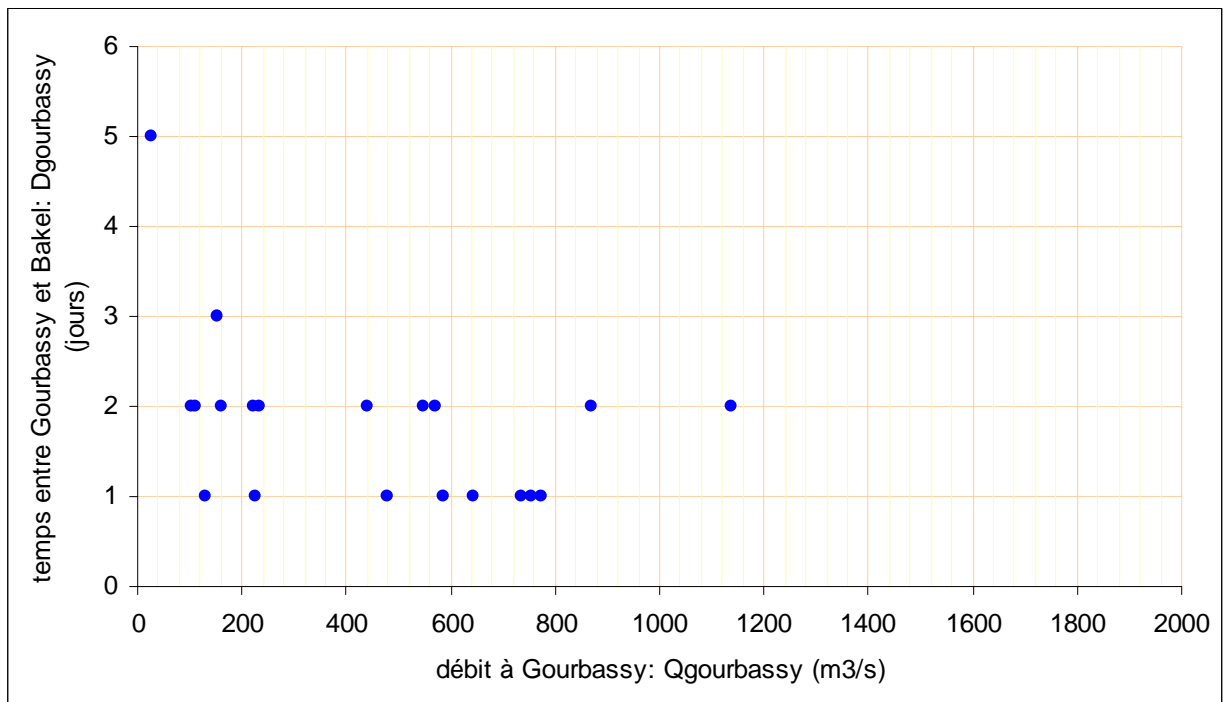


figure 6: répartition des temps de propagation entre Gourbassy et Bakel, en fonction du débit de Gourbassy. Période 1967-1999. Nombre de points caractéristiques : 20.

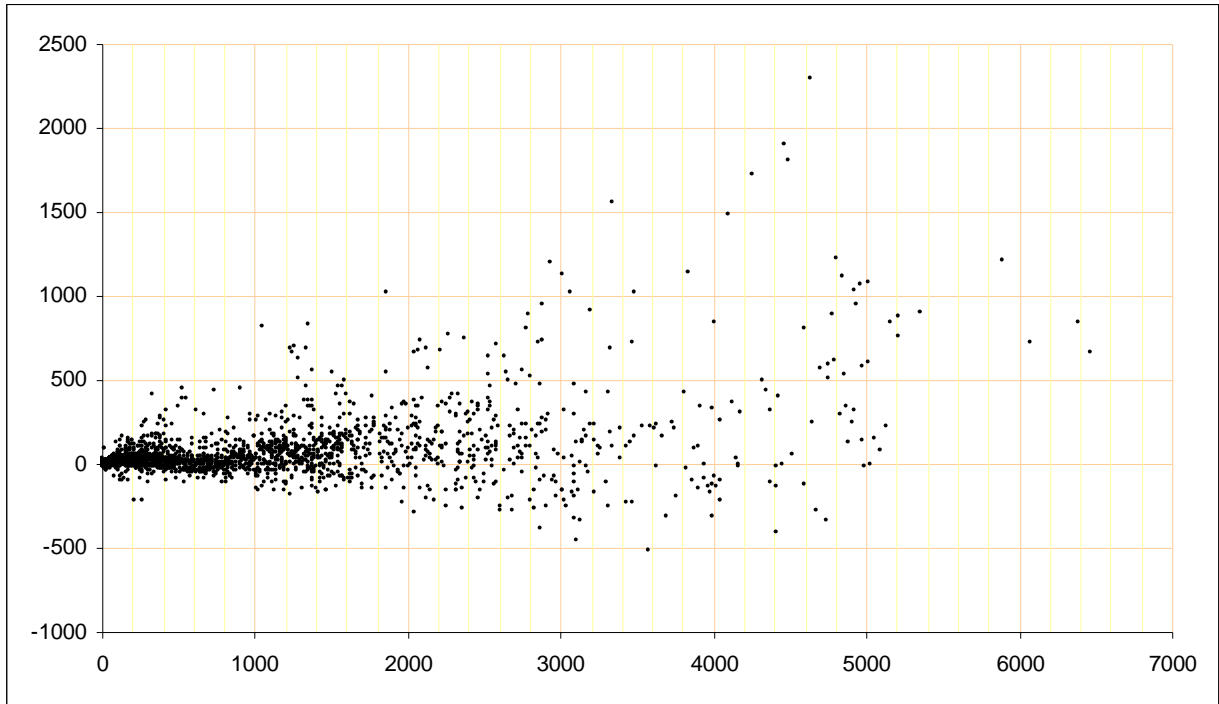


figure 7 : relation entre le débit des apports intermédiaires entre Kayes, Gourbassy et Bakel, et la somme des débits naturels à Kayes et Gourbassy, sur la période 1967-1982. Nombre de points: 3906

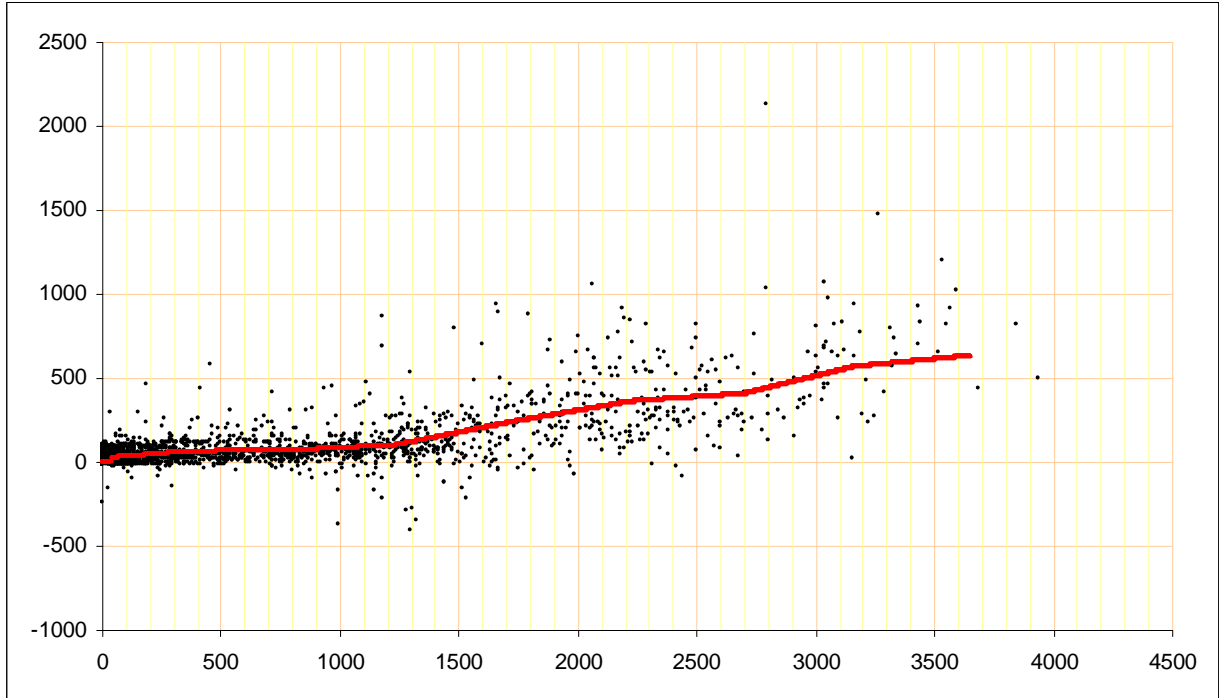


figure 8: relation entre le débit des apports intermédiaires entre Kayes, Gourbassy et Bakel, et la somme des débits naturels à Kayes et Gourbassy, sur la période 1987-1999. Nombre de points: 3316

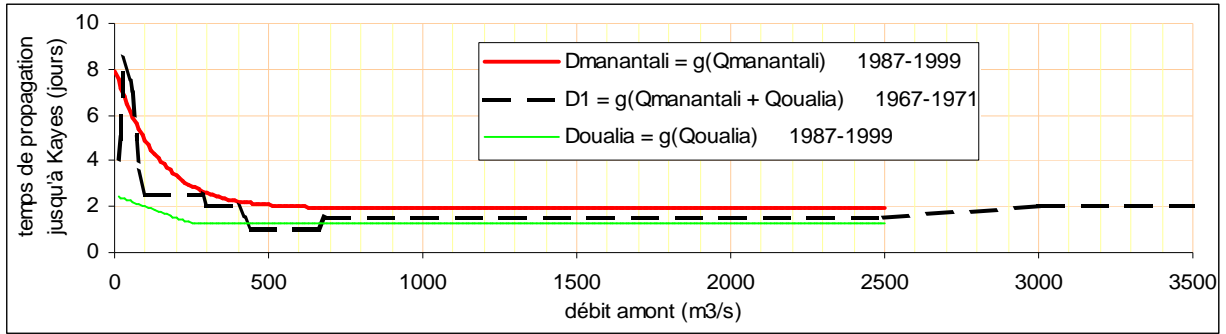


figure 9: temps de propagation entre Manantali, Oualia et Kayes. Ancien et nouveau calages

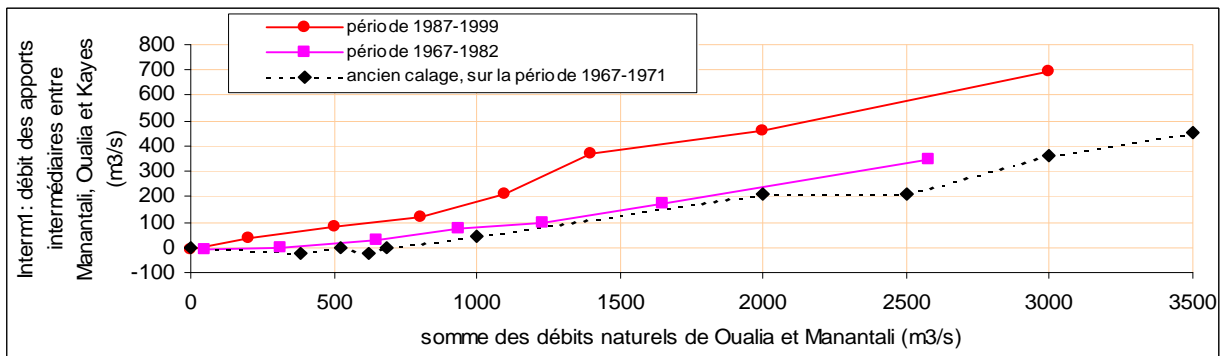


figure 10: débits intermédiaires entre Manantali, Oualia et Kayes. Ancien et nouveau calages

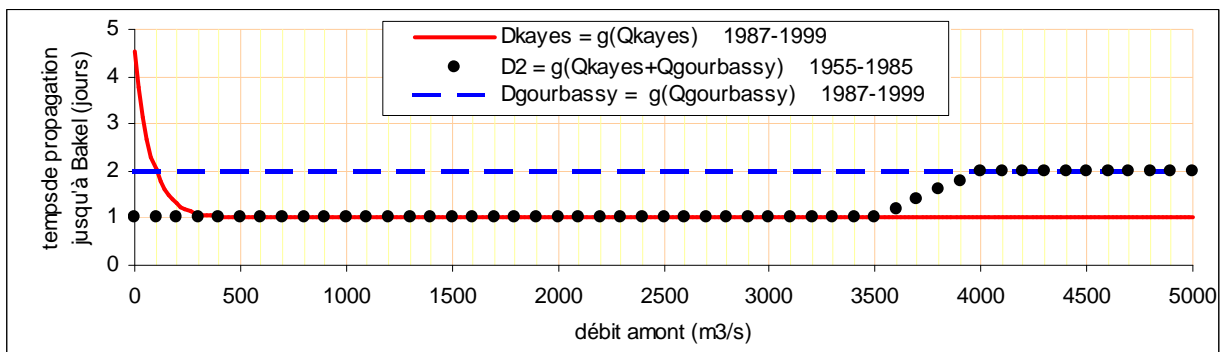


figure 11: temps de propagation entre Kayes, Goubassy et Bakel. Ancien et nouveau calage

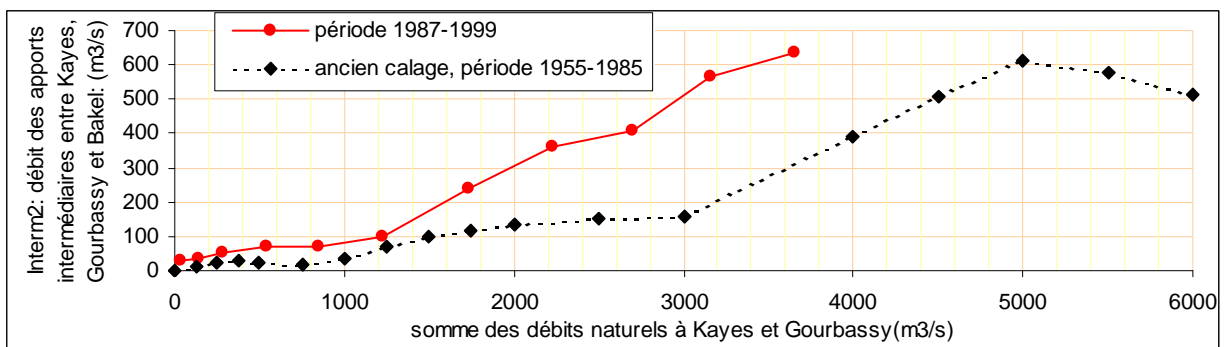


figure 12 : débits intermédiaires entre Kayes, Goubassy et Bakel. Ancien et nouveau calages

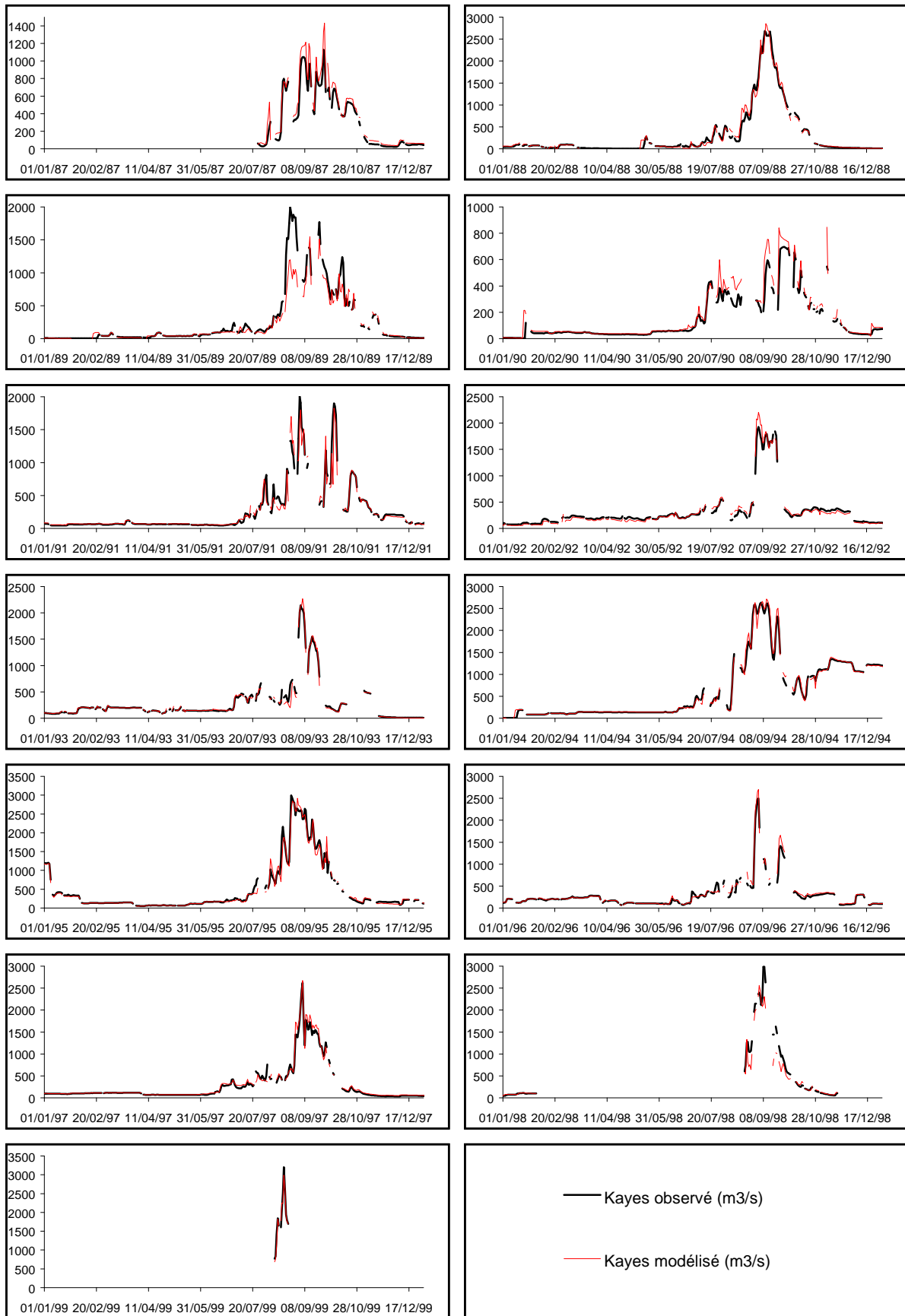


figure 13 : Débit du Sénégal à Kayes depuis 1987. Valeurs observées et valeurs modélisées à partir des débits observés à Ouاليا et du débit naturel théorique à Manantali

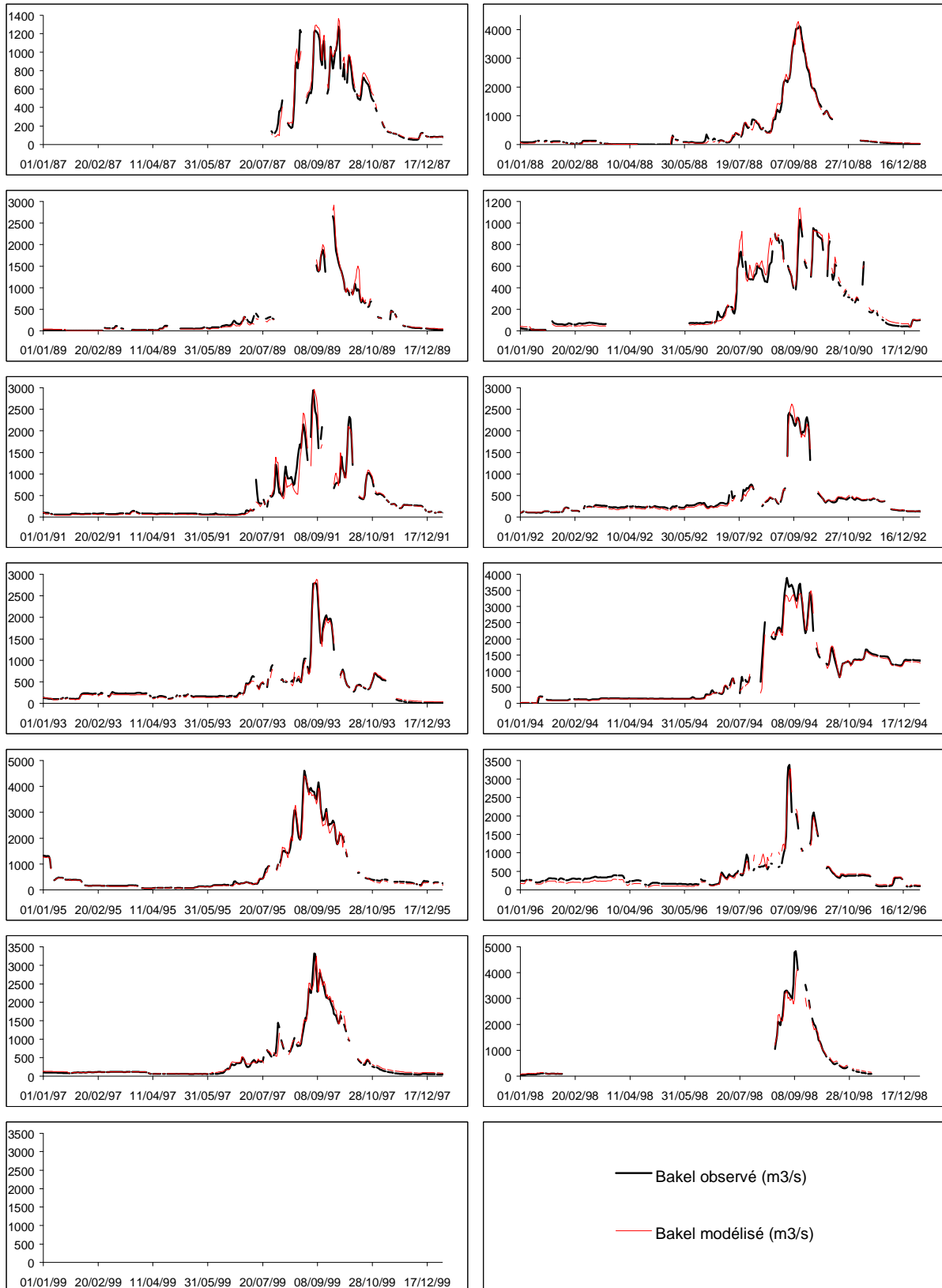


figure 14 : débit à Bakel depuis 1987; Valeurs observées et valeurs modélisées à partir des débits observés à Kayes et Gourbassy, et du débit naturel théorique à Kayes.

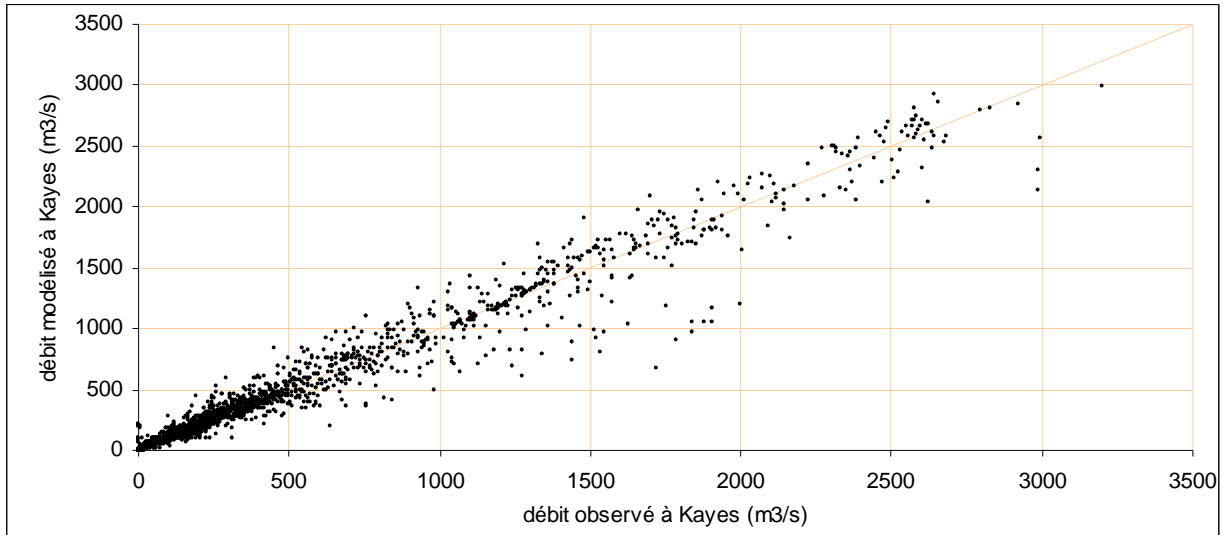


figure 15 : comparaison des débits observés et modélisés du Sénégal à Kayes, de 1987 à 1999

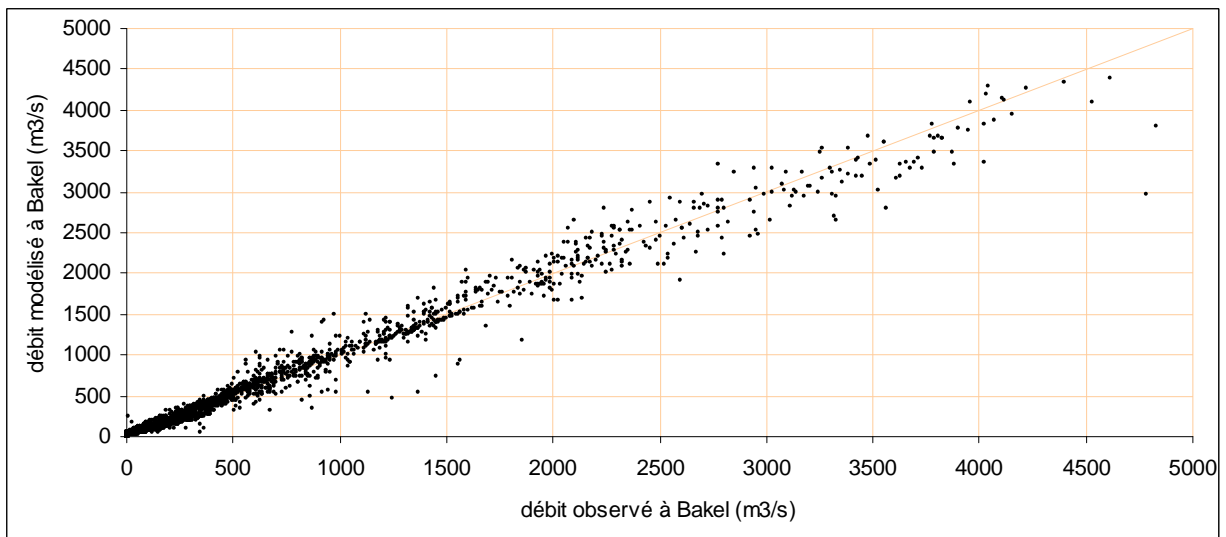


figure 16 : comparaison des débits observés et modélisés du Sénégal à Bakel, de 1987 à 1999

ANNEXE 3.2

Nouveau calage du modèle de courbe de remous du barrage de Diama

RESUME

On constate que le modèle numérique COREDIAM, représentant la courbe de remous du barrage de Diama sur le fleuve Sénégal, sous-estime (jusqu'à 41 cm) les pointes de crue observées à la station de Rosso depuis 1993. Un nouveau calage du modèle est donc effectué sur la période 1986-1998, en modifiant une partie des paramètres de la relation donnant les cotes à Rosso à partir des cotes observées à Bakel et Diama. Le nouveau jeu de paramètres obtenu améliore nettement la précision des cotes reconstituées à Rosso, au prix d'une légère surestimation de certaines pointes de crue à Dagana.

INTRODUCTION

La courbe de remous du barrage de Diama, situé à 28 km de l'embouchure du fleuve Sénégal, fait l'objet d'un modèle numérique intitulé COREDIAM. Ce modèle développé par l'ORSTOM, consiste à combiner la méthode de calcul des courbes de remous de Silber et le modèle de propagation de crue de Lamagat. A partir des cotes du lac de Diama et du Sénégal à Bakel, il permet de calculer les cotes résultantes aux stations intermédiaires. Il est décrit dans les deux notes suivantes :

Bader JC. Courbe de remous du barrage de Diama sur le Sénégal. Modèle de prévision des cotes aux stations influencées par la retenue. Hydrologie continentale, vol.7, n°2, 1992 :83-98

Bader JC. Actualisation des logiciels SIMULSEN et COREDIAM. OMVS / Hydroconsult international. Dakar, 1995. 33 p.

Sur la base des données observées sur la période 1986-1998, on teste ici le calage du modèle qui avait été proposé en 1995, et qui reposait sur la période 1988-1994.

PRECISION DU MODELE UTILISE AVEC LE CALAGE PROPOSE EN 1995

Afin d'en tester la précision, le modèle a été utilisé pour reconstituer au pas de temps journalier l'ensemble des cotes de la période 1986-1998 aux stations intermédiaires suivantes : Rosso, Dagana, Podor, Salde et Kaédi sur le Sénégal ; Guede et Ngoui sur le Doué.

En entrée du calcul, on utilise les cotes observées à Diama sous forme de moyennes journalières, et les cotes observées à Bakel sous forme de moyennes centrées sur 9 jours (pour Kaédi, Salde et Ngoui) ou 15 jours (pour Podor, Guéde, Dagana et Rosso).

Le tableau 1 présente les résultats obtenus. On constate que sur l'ensemble des cotes, l'écart absolu moyen entre valeurs modélisées et observées se situe entre 7% et 11% de l'écart type des valeurs

observées, ce qui est relativement satisfaisant. Le modèle présente par contre une précision insuffisante concernant les cotes maximales annuelles à la station de Rosso (écart type : 33 cm), avec une erreur pouvant atteindre -41 cm. En fait, le calcul sous-estime les hautes à cette station depuis 1993.

Il est donc apparu nécessaire de recalibrer le modèle sur l'ensemble des données disponibles.

NOUVEAU CALAGE DE LA RELATION DONNANT LA COTE A ROSSO A PARTIR DE CELLES DE BAKEL ET DIAMA

Pour les stations situées en amont de Rosso, le modèle calcule les cotes en combinant la méthode de Silber avec le modèle de propagation de Lamagat. Pour la station de Rosso par contre, les cotes sont calculées de la façon suivante :

$$H_r(j + t(H_b(j))) = \max(H(H_b(j) + A(H_b(j)) * H_d(j + t(H_b(j))), H_d(j + t(H_b(j))))$$

Avec :

- $H_b(j)$: cote à l'échelle de Bakel (cm), moyenne sur 15 jours centrés sur le jour j
- $H_r(j + t(H_b(j)))$: cote IGN à Rosso (cm) au jour j + t(H_b(j))
- $H_d(j + t(H_b(j)))$: cote IGN à Diama au jour j + t(H_b(j))
- $t(H_b(j))$: temps de propagation entre Bakel et Rosso, pour une cote H_b à Bakel
- A et H : paramètres évalués statistiquement en fonction de H_b

Le nouveau calage du modèle a consisté à réévaluer la fonction $A(H_b)$ en minimisant l'erreur quadratique moyenne obtenue sur l'ensemble des cotes reconstituées à Rosso. Les valeurs obtenues sont données dans le tableau 2.

REVISION DE L'ETALONNAGE DES STATIONS DE SALDE ET PODOR

L'étalonnage des stations situées à l'aval de Matam a été révisé pour le régime d'écoulement naturel (hors effet de Diama). Seuls ceux de Podor et Salde ont été modifiés, très légèrement pour la première, et plus nettement pour la deuxième de ces stations. Ces deux nouveaux étalonnages sont donnés dans les tableaux 3 et 4. Ils sont établis par la méthode du gradient limnimétrique, qui consiste à traduire les cotes H en débit Q de la façon suivante :

$$Q = Q_0(H) * (1 + K(H) * \text{grad}(H))^{0.5}$$

Avec :

- $Q_0(H)$: débit en régime permanent correspondant à la cote H
- $\text{Grad}(H)$: gradient de variation de cote (cm/jour)
- $K(H)$: coefficient de correction de gradient (jour/cm)

Les coefficients relatifs au régime permanent de ces nouveaux étalonnages ont été intégrés dans les paramètres du modèle COREDIAM. On constate que ces changements d'étalonnage ne modifient que très peu les résultats du calcul de la courbe de remous de Diama.

MODELE DE COURBE DE REMOUS RESULTANT DU NOUVEAU CALAGE DES PARAMETRES

Le tableau 5 donne le barème résultant du nouveau calage de COREDIAM, qui permet d'obtenir la cote aux stations intermédiaires en fonction de la cote journalière à Diama, et de la cote moyenne centrée sur 9 ou 15 jours à Bakel. Les différences constatées avec l'ancien barème établi en 1995, proviennent essentiellement de la modification de la relation $A (H_b)$ décrite plus haut. En dehors de Rosso, elles concernent également les cotes reconstituées à Dagana et Podor et, de façon insignifiante, à Boghe.

La figure 1 représente les lignes d'eau obtenues à partir du barème, et les figures 2 à 4 représentent les relations donnant la cote aux stations en fonction de la cote à Bakel.

PRECISION DU MODELE UTILISE AVEC LE NOUVEAU CALAGE

De la même façon qu'avec l'ancien calage, la précision du modèle obtenue avec le nouveau calage a été testée en comparant les cotes reconstituées aux différentes stations sur la période 1986-1998, avec les valeurs réellement observées. Les résultats donnés dans le tableau 6 montrent que le nouveau calage du modèle améliore les résultats à Rosso, tant pour l'ensemble des cotes que pour leurs valeurs maximales annuelles. Ceci s'accompagne de résultats légèrement moins bons (surestimation) pour les cotes maximales annuelles calculées à Dagana et, dans une moindre mesure, à Podor.

Les figures 5 à 11 permettent de comparer les limnigrammes reconstitués aux différentes stations, avec les limnigrammes observés. Pour une meilleure lisibilité, ne sont tracés sur ces figures que les points pour lesquels on dispose, le même jour, d'une valeur observée et d'une valeur modélisée. La figure 12 donne quant-à elle les limnigrammes observés à Bakel et Diama, qui sont utilisés en entrée du modèle COREDIAM. On constate sur les figures 7 à 11 la précision acceptable des cotes reconstituées, avec toutefois quelques anomalies flagrantes, qui restent à expliquer : sous-estimation des basses eaux à Guede en 1993 ; sous-estimation des basses eaux depuis 1996 à Kaédi, et depuis 1997 à Salde et Ngoui.

			Rosso	Dagana	Podor	Salde	Kaedi	Guede	Ngoui
ensemble des cotes	valeurs observées (cm)	E : écart type	62	64	91	209	204	145	204
		minimum	11	40	47	-48	-110	52	106
		moyenne	163	182	213	285	184	276	474
		maximum	286	341	519	870	771	664	1023
		N : taille d'échantillon	4115	3689	4369	4233	3779	4376	3889
	écart entre valeurs modélisées et observées (cm)	EAM/E	0,07	0,10	0,10	0,11	0,09	0,11	0,11
		EAM : valeur absolue moyenne	4,6	6,3	8,9	23,9	18,1	16,5	23,3
		EQM : moyenne quadratique	8,3	9,4	15,8	31,2	24,0	24,9	30,4
		minimum	-51	-67	-129	-133	-96	-144	-101
		moyenne	-1	-4	-6	-8	2	-2	3
N : taille d'échantillon	maximum	26	33	54	115	103	89	187	
	minimum	26	33	54	115	103	89	187	
	N : taille d'échantillon	4115	3689	4369	4233	3779	4376	3889	
	maximum	26	33	54	115	103	89	187	
	minimum	26	33	54	115	103	89	187	
cotes maximales annuelles	valeurs observées (cm)	E : écart type	33	43	82	115	105	77	107
		minimum	177	211	248	485	411	400	662
		moyenne	231	282	407	740	644	579	904
		maximum	286	341	519	870	771	664	1023
		N : taille d'échantillon	11	11	13	13	12	13	13
	écart entre valeurs modélisées et observées (cm)	EAM/E	0,36	0,21	0,21	0,16	0,13	0,30	0,24
		EAM : valeur absolue moyenne	11,8	9,2	17,4	17,9	14,1	23,0	25,6
		EQM : moyenne quadratique	16,0	12,9	21,6	23,5	16,6	27,0	31,2
		minimum	-41	-28	-6	-2	-19	5	-1
		moyenne	-8	-3	15	17	8	23	25
N : taille d'échantillon	maximum	14	22	39	57	29	51	64	
	minimum	14	22	39	57	29	51	64	
	N : taille d'échantillon	11	11	13	13	12	13	13	
	maximum	14	22	39	57	29	51	64	
	minimum	14	22	39	57	29	51	64	

Tableau 1 : Analyse de la précision du modèle COREDIAM (programme LIMDIAM) version 1995, sur la reconstitution des cotes de 1986 à 1998 aux échelles des stations situées entre Kaédi et Rosso, à partir des cotes observées à Bakel et Diama.

Hb (cm)	0	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	1000	1100	1200
H (cm)	0	0	0	7	19	35	56	86	110	132	152	167	182	195	205	215	224	243	262	280
A * 1000	1000	1000	992	971	910	833	731	604	500	407	342	290	251	225	198	179	155	109	73	36

tableau 2 : relation H(Hb) et nouvelle relation A(Hb) donnant la cote à Rosso en fonction de la cote à Bakel et à Diama

H (cm)	44	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
Qo (m3/s)	0,0	40,3	90,7	141	191	242	292	343	393	449	506	564	623	683	745	808	875
H (cm)	380	400	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600	620	640	660	680	700
Qo (m3/s)	941	1007	1073	1140	1206	1272	1338	1405	1471	1537	1603	1670	1736	1802	1868	1935	2001
H (cm)	44	175	301	381	481	700											
K*10000 (jour/cm)	0	314	259	435	418	909											

tableau 3 : étalonnage de la station de Podor, permettant de traduire en débit les cotes (échelle) non influencées par Diama

H (cm)	0	10	20	40	60	80	100	125	150	200	250	300	350	400	450	500	550
Qo (m3/s)	0,0	1,0	3,0	8,0	14,6	22,4	32,0	45,0	59,0	87,0	127	172	219	271	333	393	463
H (cm)	600	650	700	750	800	850	900	950	999								
Qo (m3/s)	533	611	691	769	874	971	1060	1208	1384								
H (cm)	0	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000		
K*10000 (jour/cm)	332	332	332	332	330	327	320	324	330	344	350	330	260	160	100		

tableau 4 : étalonnage de la station de Salde

cote à l'échelle de Bakel	cotes (m IGN) aux stations, et temps de propagation moyen depuis Bakel (jour). L'étoile indique les cotes influencées par le barrage																cote à Diama
	Kaédi		Salde		Ngoui		Boghe		Podor		Guede		Dagana		Rosso		
1	3,76	5	1,96	7	2,11	6	0,29	7	0,08	7	0,08	8	0,08	8	0,07	8	
2	5,07	5	3,30	7	3,36	6	1,08	7	0,44	7	0,84	8	0,32	8	0,30	8	
3	6,60	5	4,78	7	4,80	6	2,42	7	0,80	7	2,28	8	0,54	9	0,48	9	
4	7,92	5	6,18	7	6,21	6	3,74	7	1,63	8	3,58	8	1,00	10	0,83	10	
5	9,00	5	7,29	6	7,38	6	4,87	7	2,57	10	4,49	8	1,45	12	1,20	12	
6	9,80	5	8,12	6	8,24	7	5,90	8	3,29	11	5,05	10	1,82	13	1,48	14	
7	10,30	5	8,70	6	8,75	8	6,64	8	3,74	14	5,48	12	2,13	16	1,73	17	
8	10,74	6	9,22	7	9,16	9	7,11	10	4,17	16	5,76	14	2,38	20	1,93	21	
9	11,16	8	9,79	10	9,61	11	7,52	14	4,56	20	6,00	16	2,60	23	2,11	24	
10	11,59	9	10,22	12	9,99	13	7,81	16	4,94	23	6,17	18	2,81	27	2,27	28	
1	3,76	5	1,96	7	2,11	6	0,52 *	7	0,50 *	7	0,51 *	8	0,50 *	8	0,50 *	8	0,50
2	5,07	5	3,30	7	3,36	6	1,08	7	0,60 *	7	0,90 *	8	0,52 *	8	0,50 *	8	0,50
3	6,60	5	4,78	7	4,80	6	2,42	7	0,89 *	7	2,28	8	0,70 *	9	0,64 *	9	0,50
4	7,92	5	6,18	7	6,21	6	3,74	7	1,68 *	8	3,58	8	1,08 *	10	0,93 *	10	0,50
5	9,00	5	7,29	6	7,38	6	4,87	7	2,58 *	10	4,49	8	1,57 *	12	1,35 *	12	0,50
6	9,80	5	8,12	6	8,24	7	5,90	8	3,29	11	5,05	10	1,98 *	13	1,69 *	14	0,50
7	10,30	5	8,70	6	8,75	8	6,64	8	3,76 *	14	5,48	12	2,30 *	16	1,95 *	17	0,50
8	10,74	6	9,22	7	9,16	9	7,11	10	4,20 *	16	5,76	14	2,55 *	20	2,15 *	21	0,50
9	11,16	8	9,79	10	9,61	11	7,52	14	4,59 *	20	6,00	16	2,76 *	23	2,32 *	24	0,50
10	11,59	9	10,22	12	9,99	13	7,81	16	4,96 *	23	6,17	18	2,97 *	27	2,48 *	28	0,50
1	3,76	5	1,96	7	2,11	6	1,01 *	7	1,00 *	7	1,00 *	8	1,00 *	8	1,00 *	8	1,00
2	5,07	5	3,30	7	3,36	6	1,25 *	7	1,05 *	7	1,16 *	8	1,01 *	8	1,00 *	8	1,00
3	6,60	5	4,78	7	4,80	6	2,42	7	1,27 *	7	2,28	8	1,13 *	9	1,10 *	9	1,00
4	7,92	5	6,18	7	6,21	6	3,74	7	1,87 *	8	3,58	8	1,39 *	10	1,29 *	10	1,00
5	9,00	5	7,29	6	7,38	6	4,87	7	2,68 *	10	4,49	8	1,79 *	12	1,60 *	12	1,00
6	9,80	5	8,12	6	8,24	7	5,91 *	8	3,29 *	11	5,05	10	2,12 *	13	1,86 *	14	1,00
7	10,30	5	8,70	6	8,75	8	6,64	8	3,78 *	14	5,48	12	2,39 *	16	2,07 *	17	1,00
8	10,74	6	9,22	7	9,16	9	7,11	10	4,21 *	16	5,76	14	2,62 *	20	2,25 *	21	1,00
9	11,16	8	9,79	10	9,61	11	7,52	14	4,60 *	20	6,00	16	2,82 *	23	2,39 *	24	1,00
10	11,59	9	10,22	12	9,99	13	7,81	16	4,96 *	23	6,17	18	3,02 *	27	2,54 *	28	1,00
1	3,76	5	1,96	7	2,11	6	1,50 *	7	1,50 *	7	1,50 *	8	1,50 *	8	1,50 *	8	1,50
2	5,07	5	3,30	7	3,36	6	1,65 *	7	1,54 *	7	1,59 *	8	1,51 *	8	1,50 *	8	1,50
3	6,60	5	4,78	7	4,80	6	2,42	7	1,67 *	7	2,28	8	1,58 *	9	1,55 *	9	1,50
4	7,92	5	6,18	7	6,21	6	3,74	7	2,11 *	8	3,58	8	1,74 *	10	1,66 *	10	1,50
5	9,00	5	7,29	6	7,38	6	4,87	7	2,76 *	10	4,49	8	2,01 *	12	1,85 *	12	1,50
6	9,80	5	8,12	6	8,24	7	5,92 *	8	3,34 *	11	5,05	10	2,27 *	13	2,03 *	14	1,50
7	10,30	5	8,70	6	8,75	8	6,64	8	3,82 *	14	5,48	12	2,50 *	16	2,20 *	17	1,50
8	10,74	6	9,22	7	9,16	9	7,11	10	4,24 *	16	5,76	14	2,71 *	20	2,35 *	21	1,50
9	11,16	8	9,79	10	9,61	11	7,52	14	4,61 *	20	6,00	16	2,89 *	23	2,47 *	24	1,50
10	11,59	9	10,22	12	9,99	13	7,81	16	4,96 *	23	6,17	18	3,05 *	27	2,59 *	28	1,50
1	3,76	5	2,01 *	7	2,11	6	2,00 *	7	2,00 *	7	2,00 *	8	2,00 *	8	2,00 *	8	2,00
2	5,07	5	3,30	7	3,36	6	2,10 *	7	2,03 *	7	2,05 *	8	2,00 *	8	2,00 *	8	2,00
3	6,60	5	4,78	7	4,80	6	2,46 *	7	2,10 *	7	2,28	8	2,03 *	9	2,01 *	9	2,00
4	7,92	5	6,18	7	6,21	6	3,74	7	2,37 *	8	3,58	8	2,09 *	10	2,02 *	10	2,00
5	9,00	5	7,29	6	7,38	6	4,87	7	2,88 *	10	4,49	8	2,24 *	12	2,10 *	12	2,00
6	9,80	5	8,12	6	8,24	7	5,90	8	3,41 *	11	5,05	10	2,42 *	13	2,20 *	14	2,00
7	10,30	5	8,70	6	8,75	8	6,64	8	3,85 *	14	5,48	12	2,61 *	16	2,32 *	17	2,00
8	10,74	6	9,22	7	9,16	9	7,11	10	4,26 *	16	5,76	14	2,79 *	20	2,45 *	21	2,00
9	11,16	8	9,79	10	9,61	11	7,52	14	4,63 *	20	6,00	16	2,95 *	23	2,55 *	24	2,00
10	11,59	9	10,22	12	9,99	13	7,81	16	4,97 *	23	6,17	18	3,10 *	27	2,65 *	28	2,00
1	3,76	5	2,51 *	7	2,50 *	6	2,50 *	7	2,50 *	7	2,50 *	8	2,50 *	8	2,50 *	8	2,50
2	5,07	5	3,30	7	3,36	6	2,57 *	7	2,52 *	7	2,53 *	8	2,50 *	8	2,50 *	8	2,50
3	6,60	5	4,78	7	4,80	6	2,82 *	7	2,57 *	7	2,65 *	8	2,51 *	9	2,50 *	9	2,50
4	7,92	5	6,18	7	6,21	6	3,74	7	2,77 *	8	3,58	8	2,55 *	10	2,50 *	10	2,50
5	9,00	5	7,29	6	7,38	6	4,87	7	3,15 *	10	4,49	8	2,61 *	12	2,50 *	12	2,50
6	9,80	5	8,12	6	8,24	7	5,90	8	3,55 *	11	5,05	10	2,69 *	13	2,50 *	14	2,50
7	10,30	5	8,70	6	8,75	8	6,64	8	3,93 *	14	5,48	12	2,76 *	16	2,50 *	17	2,50
8	10,74	6	9,22	7	9,16	9	7,11	10	4,29 *	16	5,76	14	2,87 *	20	2,55 *	21	2,50
9	11,16	8	9,79	10	9,61	11	7,52	14	4,64 *	20	6,00	16	3,01 *	23	2,63 *	24	2,50
10	11,59	9	10,22	12	9,99	13	7,81	16	4,98 *	23	6,17	18	3,14 *	27	2,70 *	28	2,50

tableau 5 : barème de la courbe de remous en fonction de la cote à Diama et de la cote moyenne centrée à Bakel (sur 9 jours pour Kaédi, Salde et Ngoui, et sur 15 jours pour les autres stations)

			Rosso	Dagana	Podor	Salde	Kaedi	Guede	Ngoui
ensemble des cotes	valeurs observées (cm)	E : ecartype	62	64	92	209	204	145	204
		minimum	11	40	47	-48	-110	52	106
		moyenne	163	182	212	285	184	276	474
		maximum	286	341	519	870	771	664	1023
		N : taille d'échantillon	4115	3689	4378	4233	3779	4376	3889
	écart entre valeurs modélisées et observées (cm)	EAME	0,06	0,10	0,10	0,11	0,09	0,12	0,11
		EAM : valeur absolue moyenne	4,0	6,1	9,0	23,9	18,1	16,7	23,3
		EQM : moyenne quadratique	6,6	9,0	15,8	31,2	24,0	25,0	30,4
		minimum	-42	-67	-129	-133	-96	-144	-101
		moyenne	0	-3	-5	-8	2	-2	3
maximum	37	39	60	115	103	89	187		
N : taille d'échantillon	4115	3689	4378	4233	3779	4376	3889		
cotes maximales annuelles	valeurs observées (cm)	E : ecartype	33	43	82	115	105	77	107
		minimum	177	211	248	485	411	400	662
		moyenne	231	282	407	740	644	579	904
		maximum	286	341	519	870	771	664	1023
		N : taille d'échantillon	11	11	13	13	12	13	13
	écart entre valeurs modélisées et observées (cm)	EAME	0,33	0,27	0,24	0,16	0,13	0,30	0,24
		EAM : valeur absolue moyenne	10,8	11,5	20,0	17,9	14,1	23,0	25,6
		EQM : moyenne quadratique	13,9	15,2	25,2	23,5	16,6	27,0	31,2
		minimum	-12	-6	-5	-2	-19	5	-1
		moyenne	8	10	19	17	8	23	25
maximum	33	37	45	57	29	51	64		
N : taille d'échantillon	11	11	13	13	12	13	13		

Tableau 6 : Analyse de la précision du modèle COREDIAM (programme LIMDIAM) version 1999, sur la reconstitution des cotes de 1986 à 1998 aux échelles des stations situées entre Kaédi et Rosso, à partir des cotes observées à Bakel et Diama.

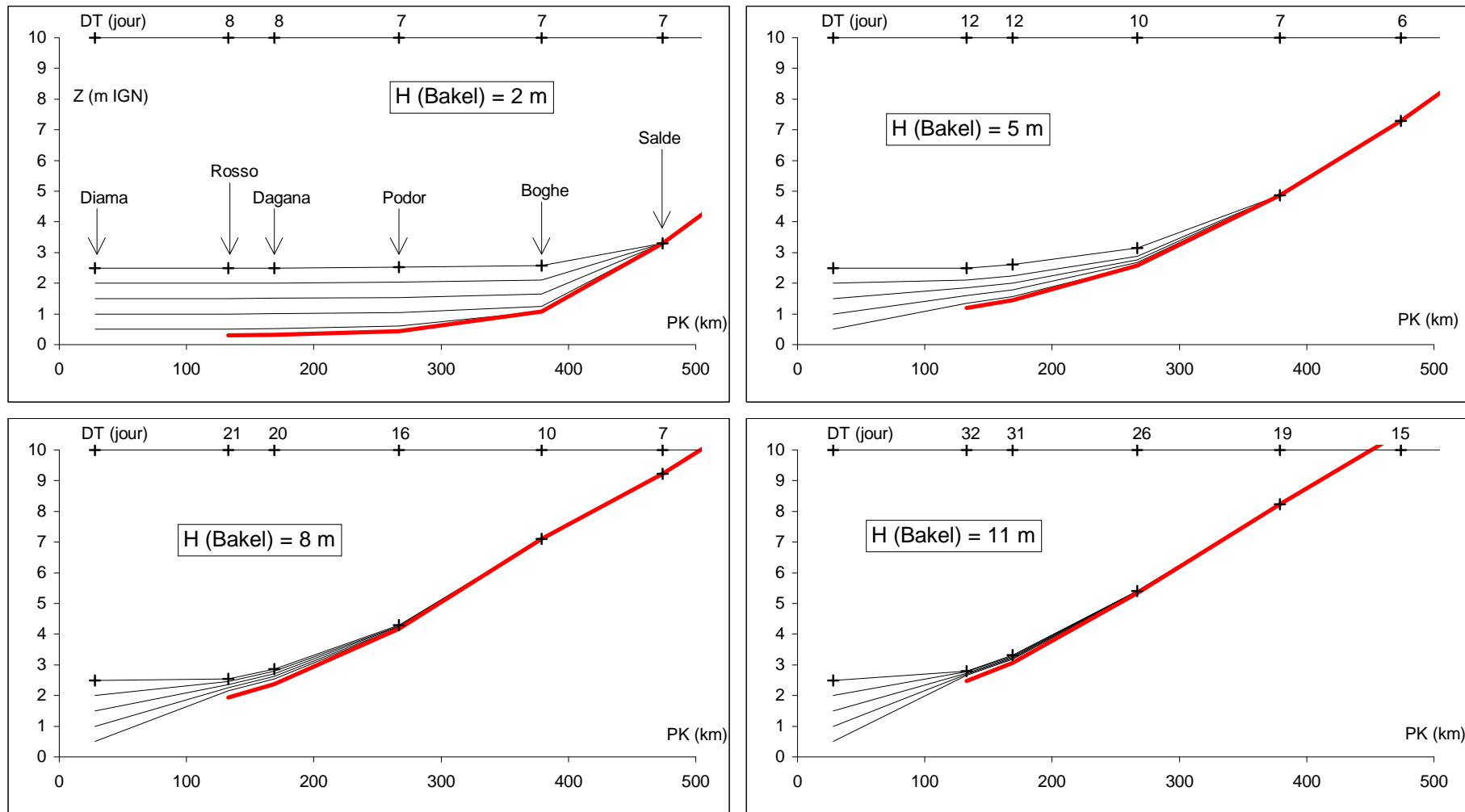


figure 1 : Comparaison des lignes d'eau modélisées pour différentes cotes à Diama, et pour le régime naturel (absence de barrage : trait gras). Pour une cote H à l'échelle de Bakel au jour j , la cote IGN Z est donnée aux stations à l'aval pour le temps $j + DT$.

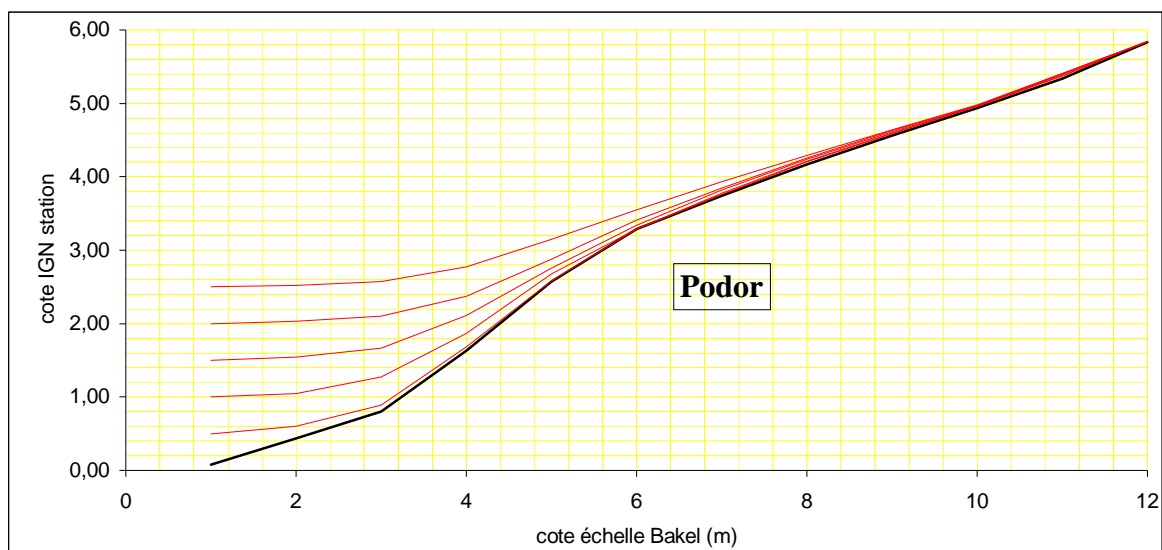
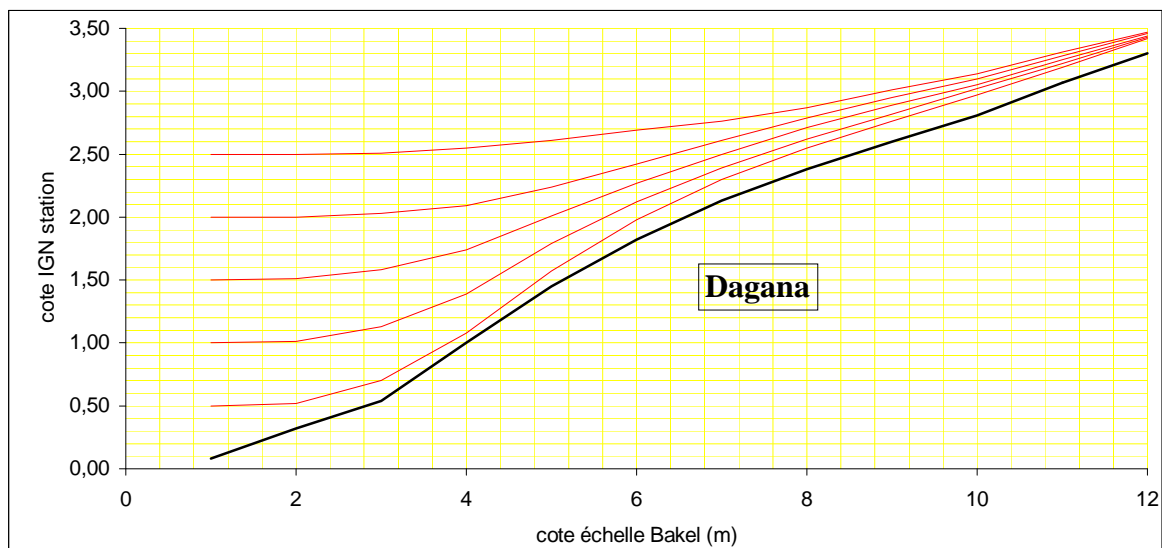
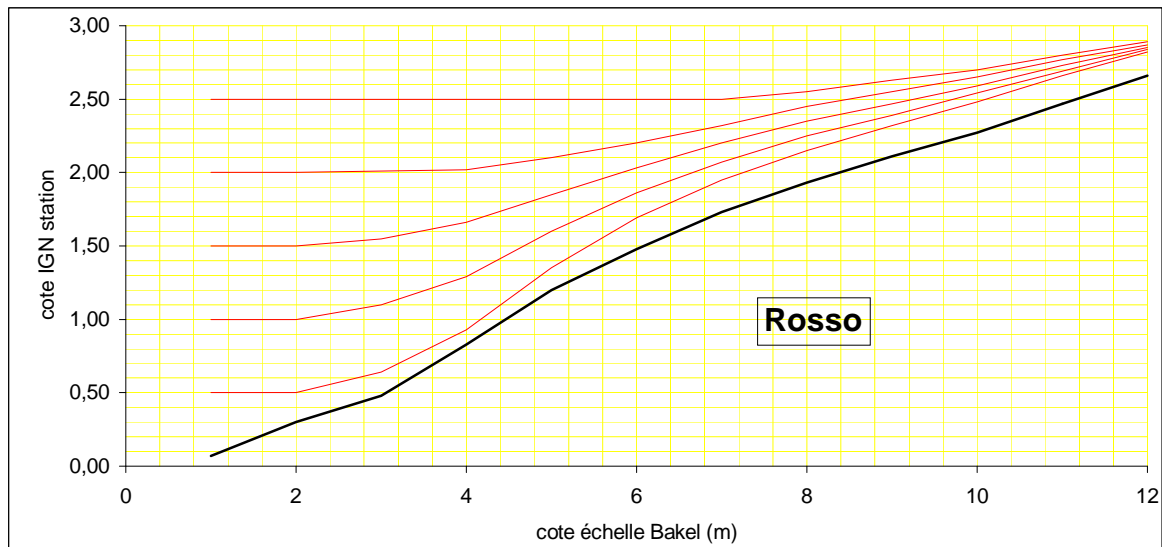


figure 2 : cotes aux stations situées dans le remous de Diama en fonction de la cote à Bakel, pour différents cas à Diama: absence de barrage; cote du lac fixée à 50, 100, 150, 200 et 250 cm

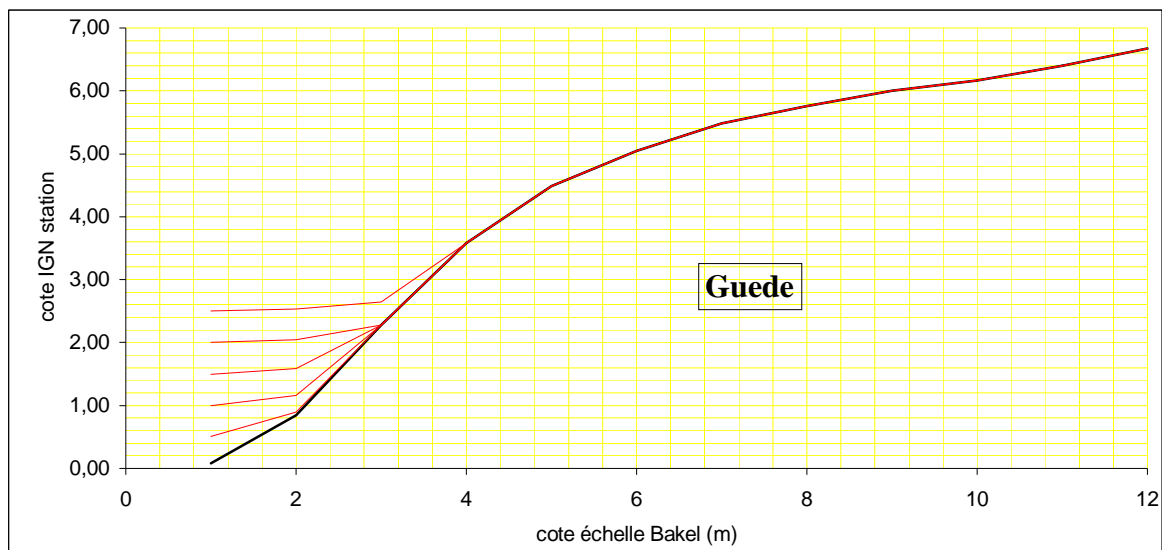
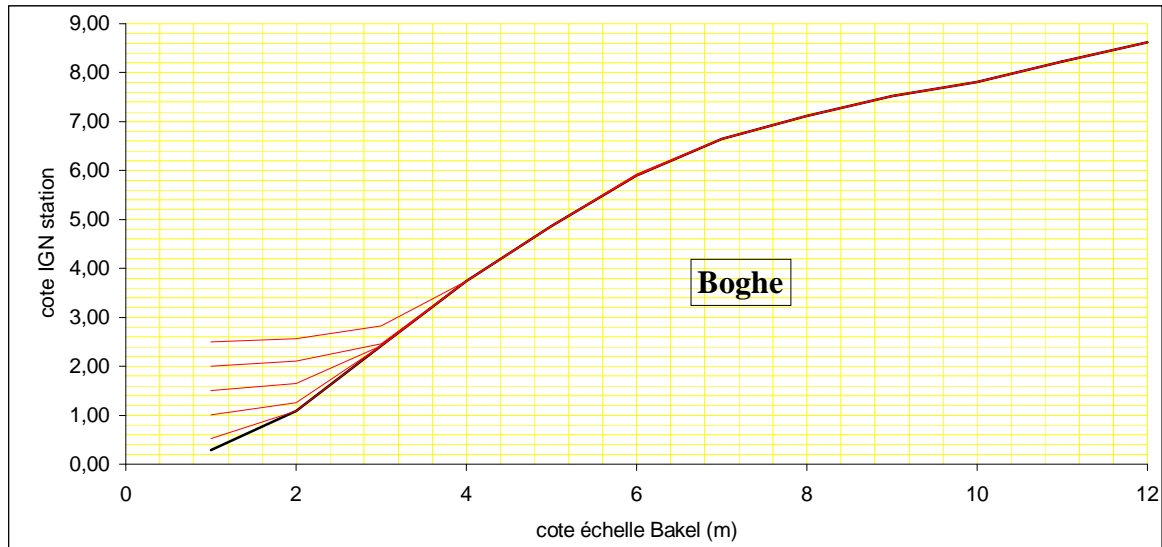


figure 3 : cotes aux stations situées dans le remous de Diama en fonction de la cote à Bakel, pour différents cas à Diama: absence de barrage; cote du lac fixée à 50, 100, 150, 200 et 250 cm

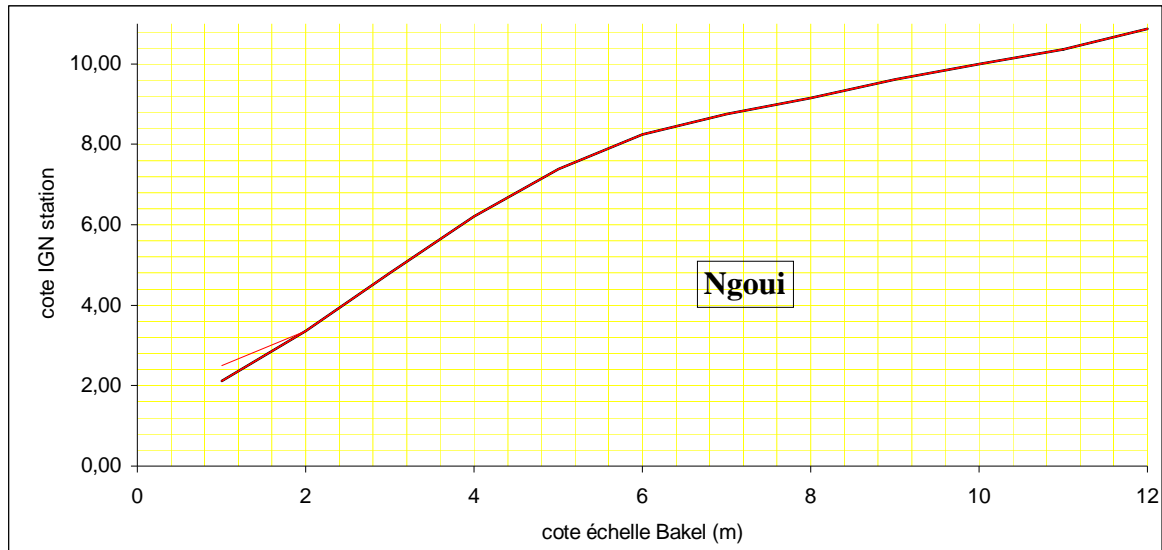


figure 4 : cotes aux stations situées dans le remous de Diama en fonction de la cote à Bakel, pour différents cas à Diama: absence de barrage; cote du lac fixée à 50, 100, 150, 200 et 250 cm

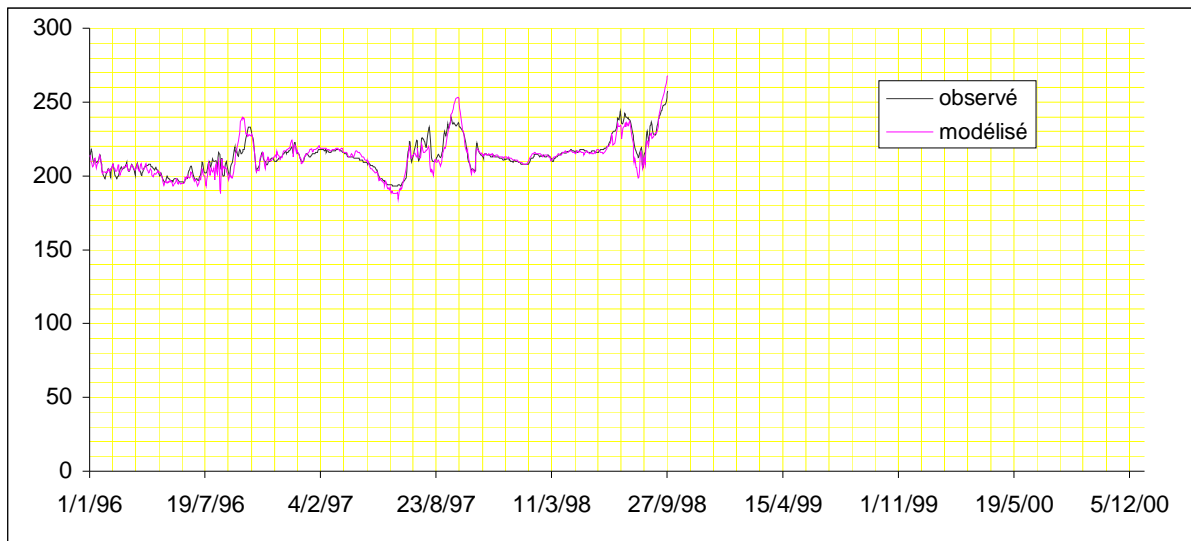
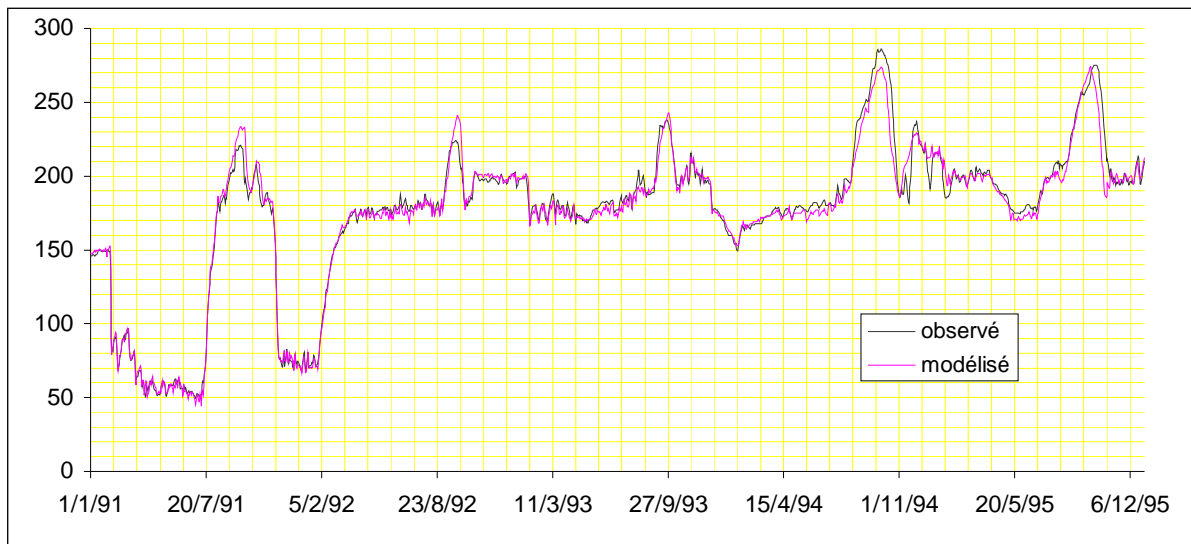
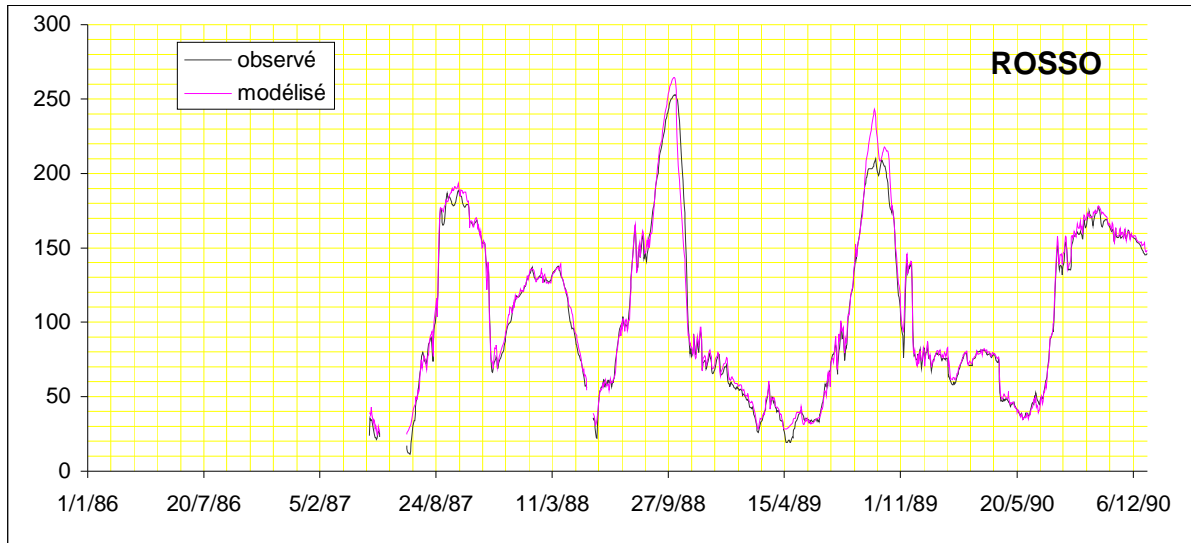


figure 5 : cote à l'échelle de Rosso. Valeurs observées et valeurs modélisées avec COREDIAM (programme LIMDIAM) version 1999, à partir de Bakel (moyenne mobile sur 15 jours) et Diama observés.

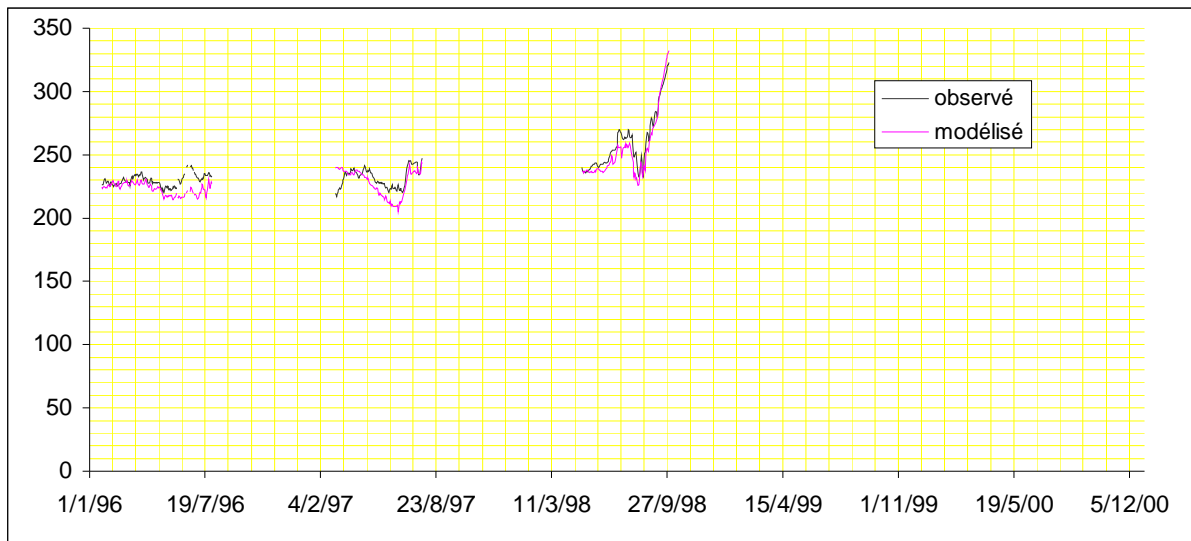
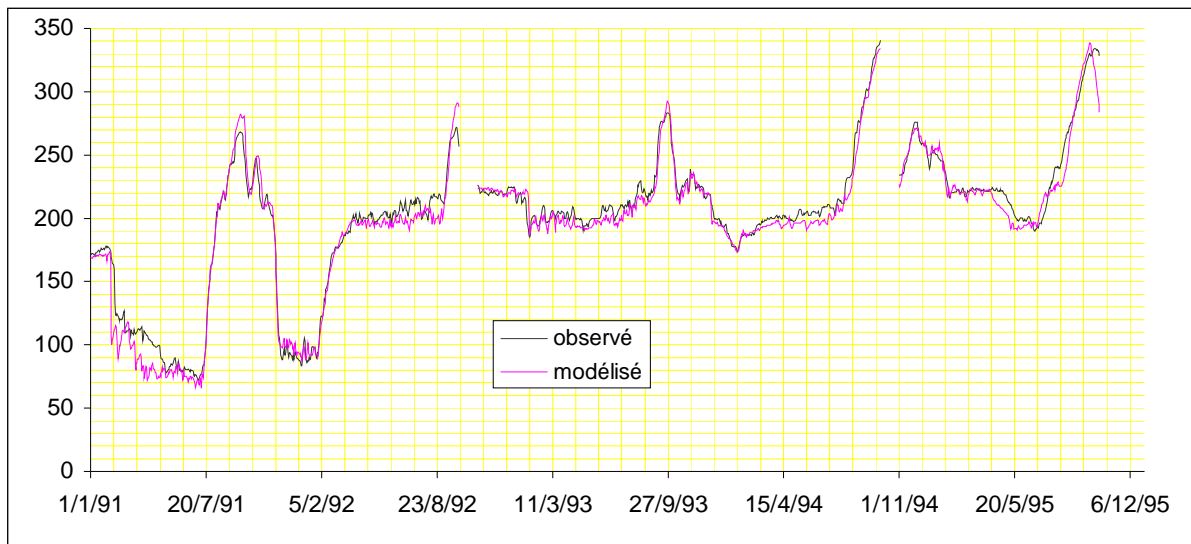
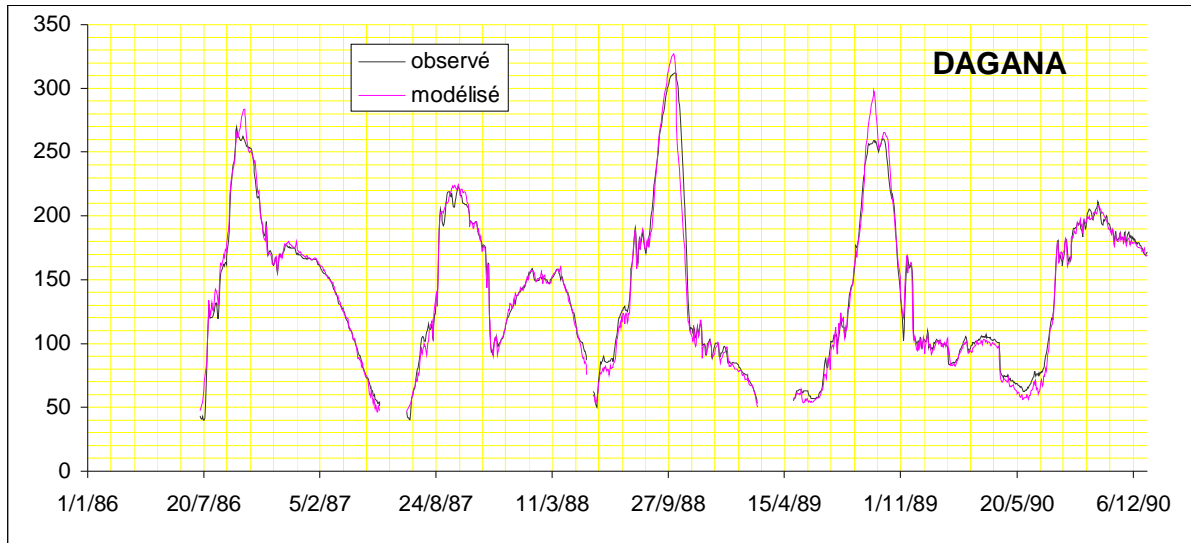


figure 6 : cote à l'échelle de Dagana. Valeurs observées et valeurs modélisées avec COREDIAM (programme LIMDIAM) version 1999, à partir de Bakel (moyenne mobile sur 15 jours) et Diama observés

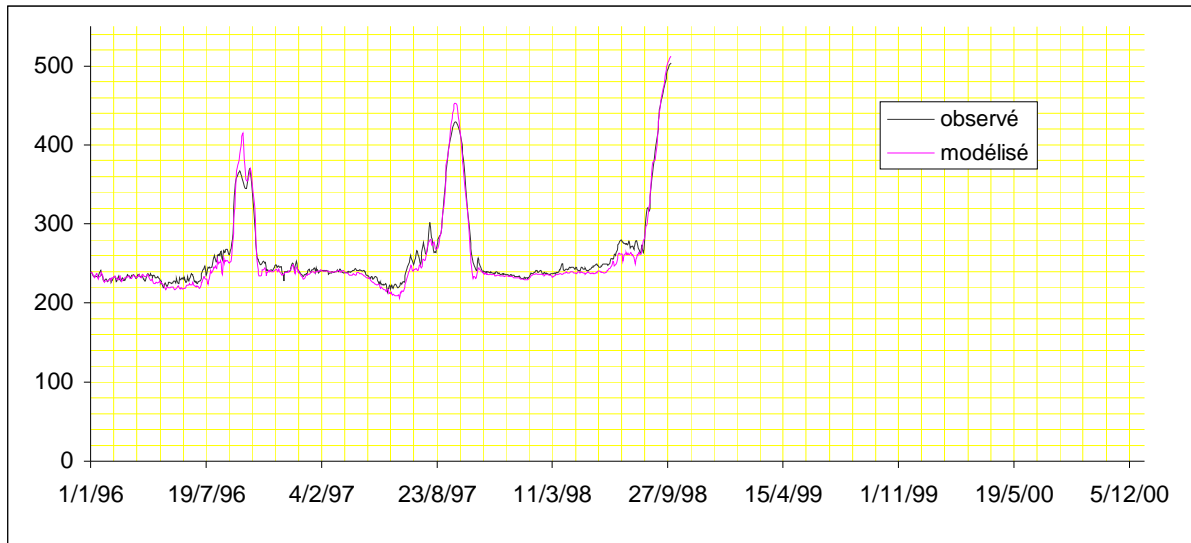
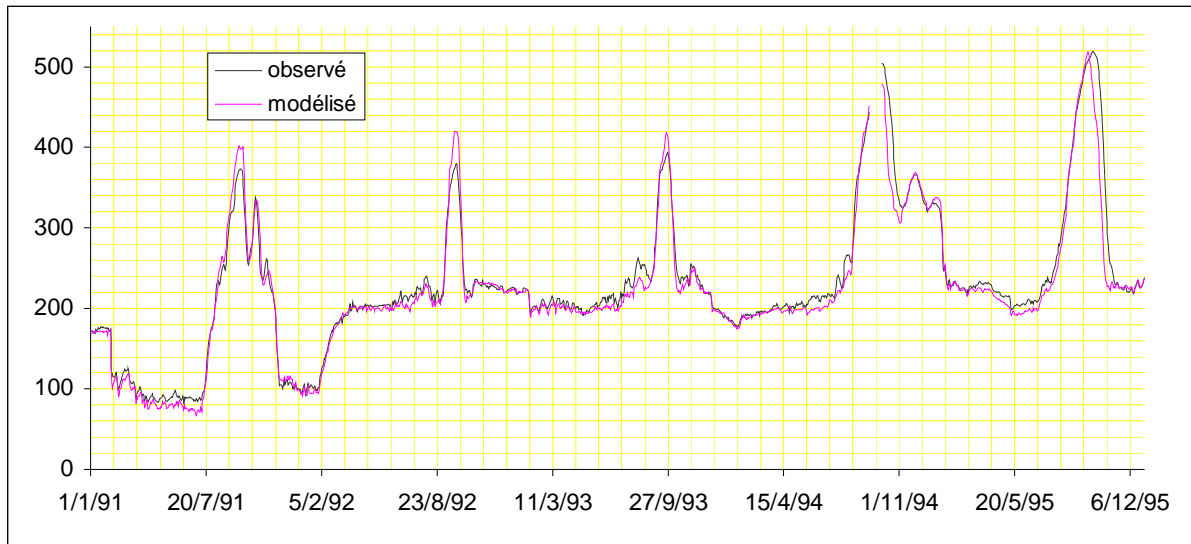
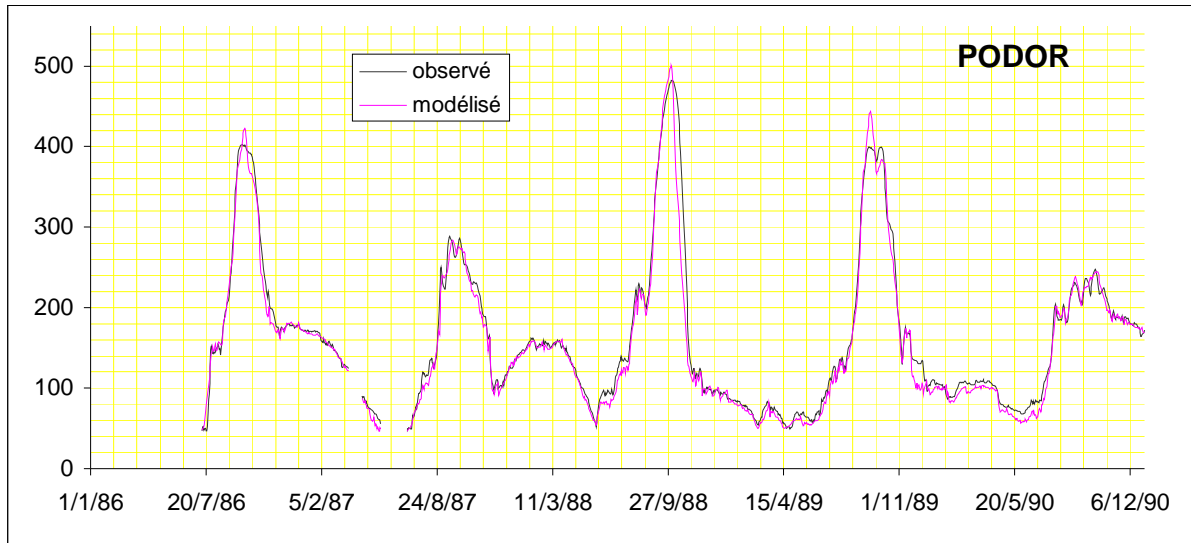


figure 7 : cote à l'échelle de Podor. Valeurs observées et valeurs modélisées avec COREDIAM (programme LIMDIAM) version 1999, à partir de Bakel (moyenne mobile sur 15 jours) et Diama observés

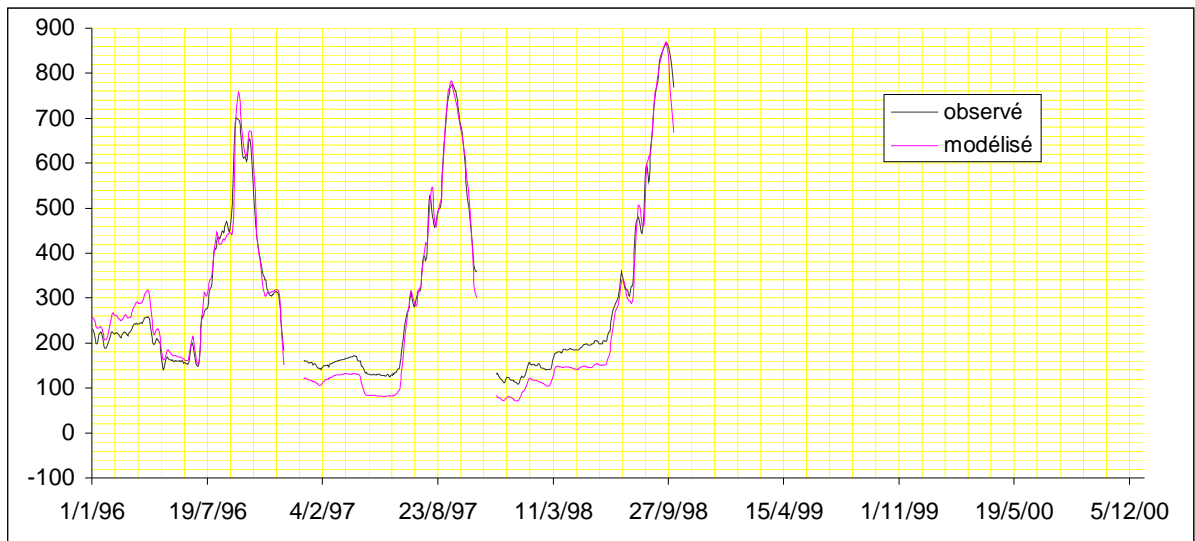
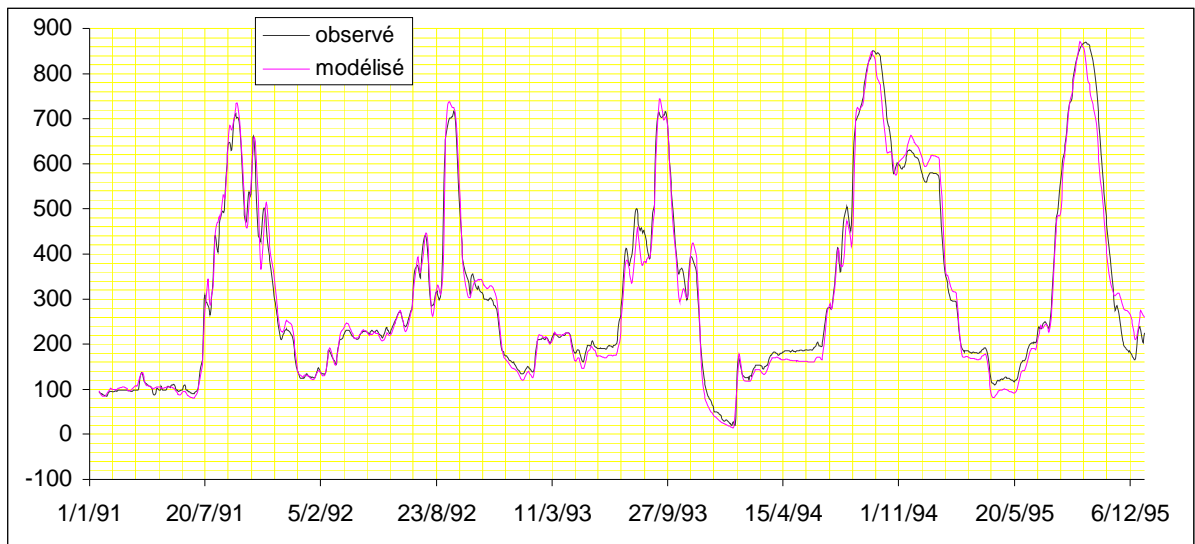
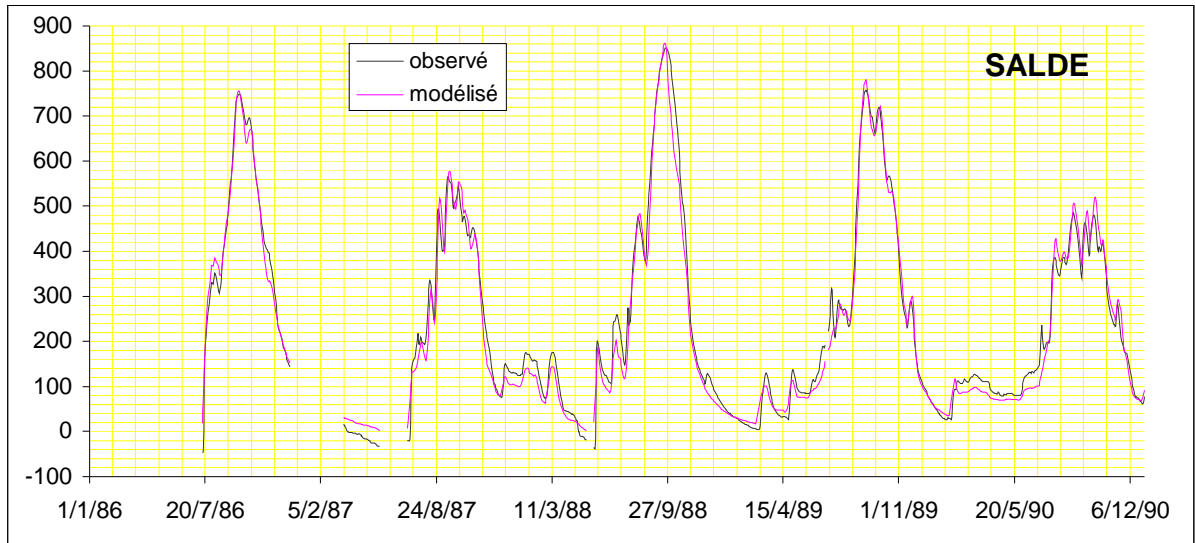


figure 8 : cote à l'échelle de Salde. Valeurs observées et valeurs modélisées avec COREDIAM (programme LIMDIAM) version 1999, à partir de Bakel (moyenne mobile sur 9 jours) et Diama observés

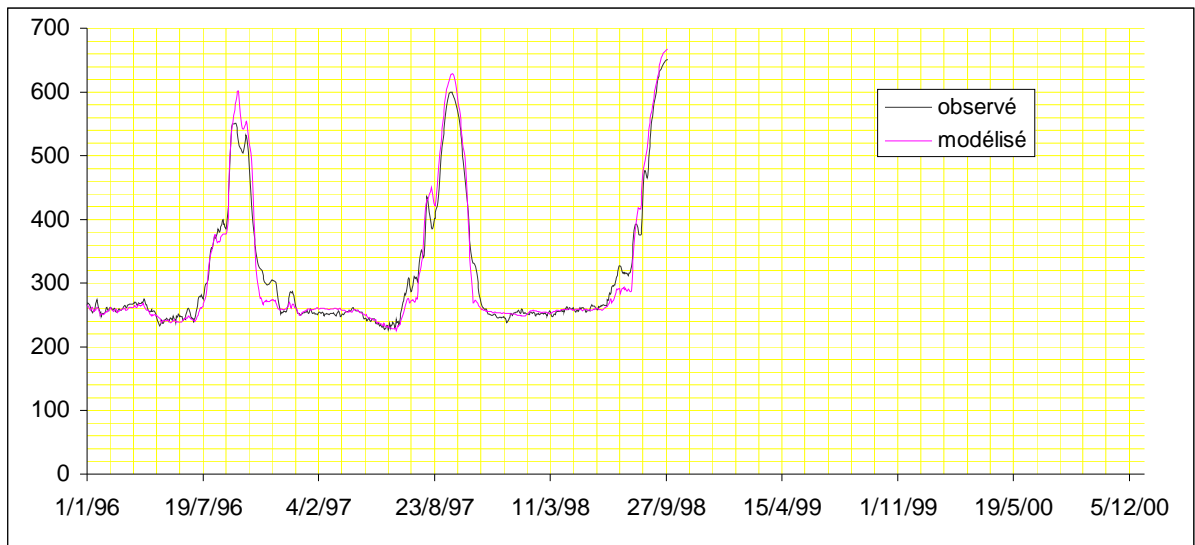
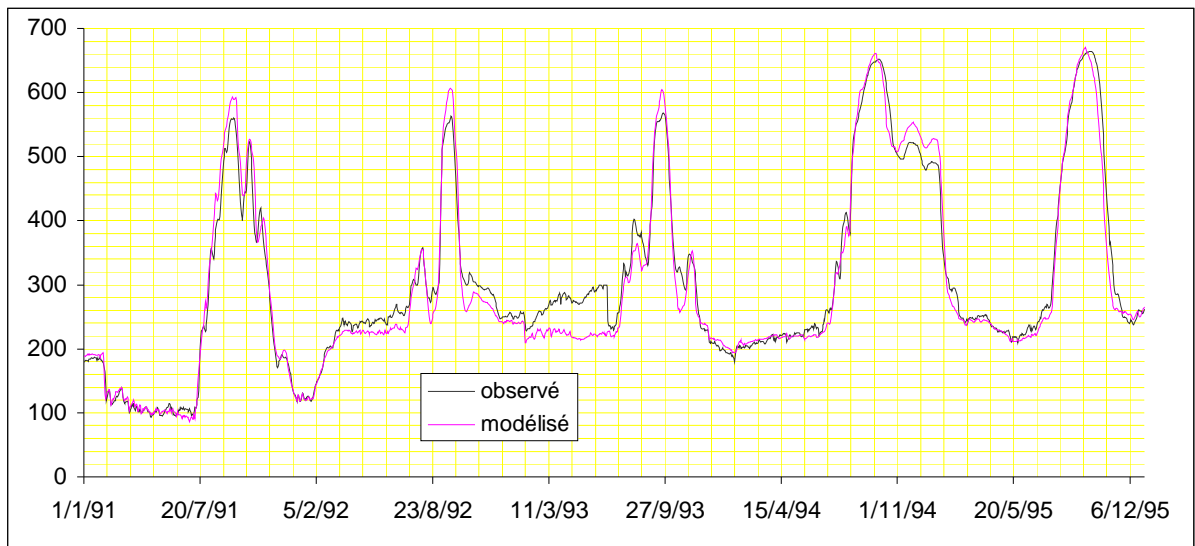
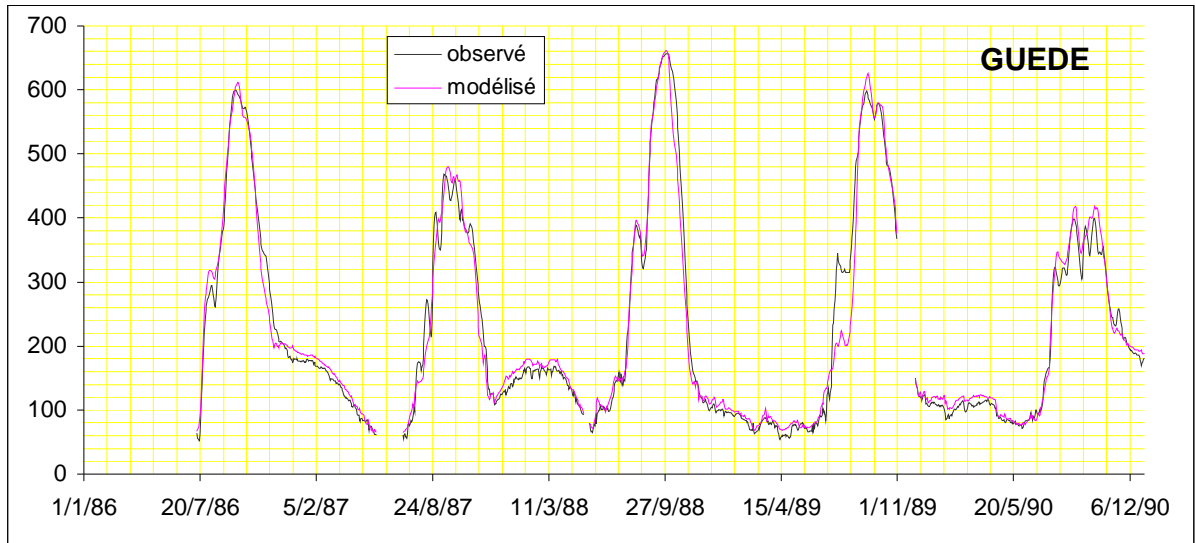


figure 9 : cote à l'échelle de Guede. Valeurs observées et valeurs modélisées avec COREDIAM (programme LIMDIAM) version 1999, à partir de Bakel (moyenne mobile sur 15 jours) et Diama observés

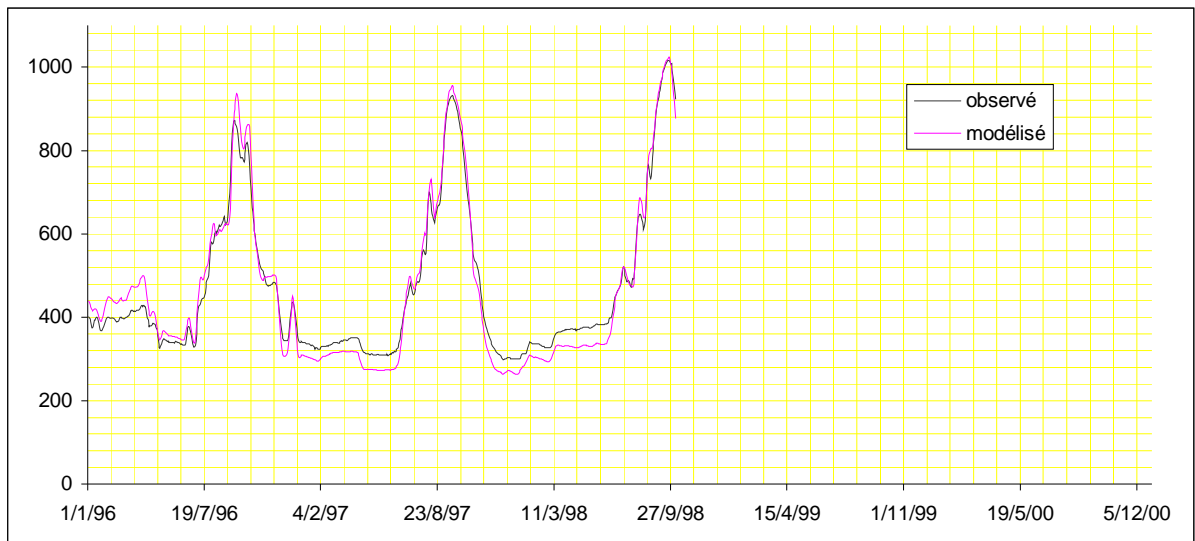
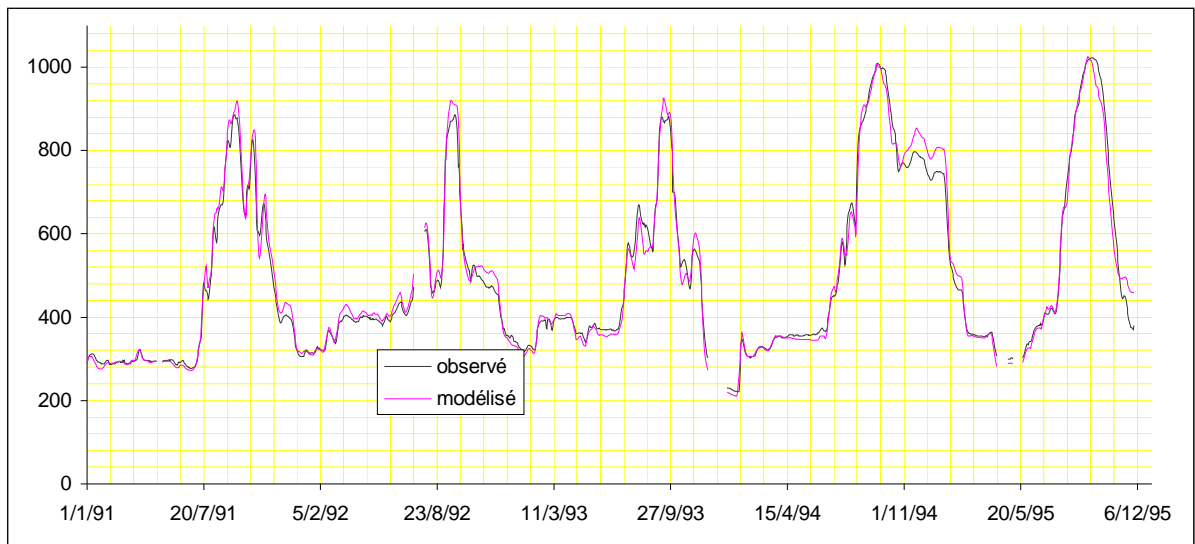
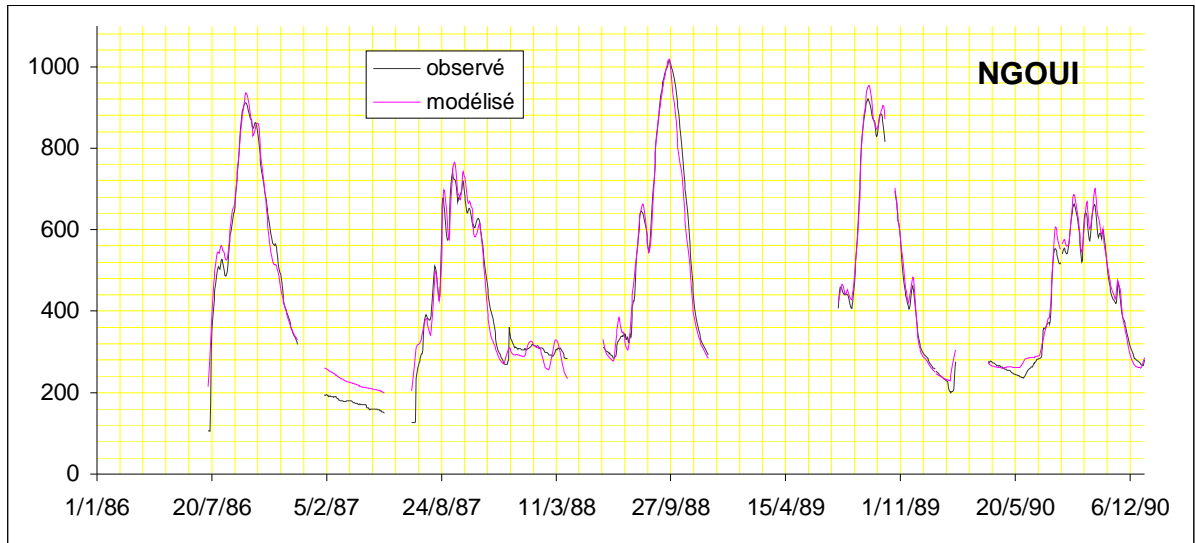


figure 10 : cote à l'échelle de Ngoui. Valeurs observées et valeurs modélisées avec COREDIAM (programme LIMDIAM) version 1999, à partir de Bakel (moyenne mobile sur 9 jours) et Diama observés

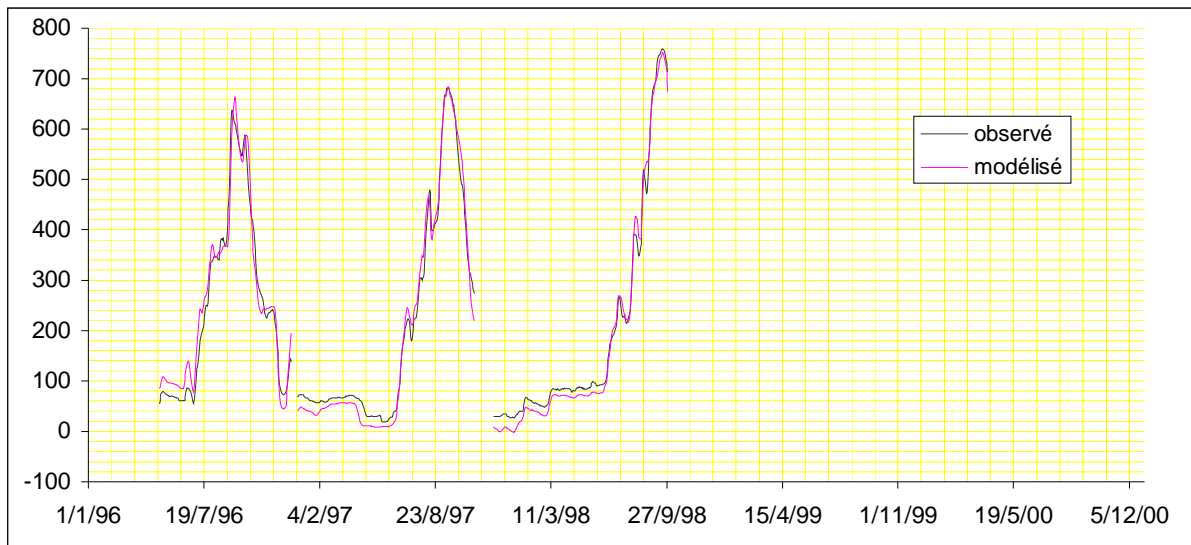
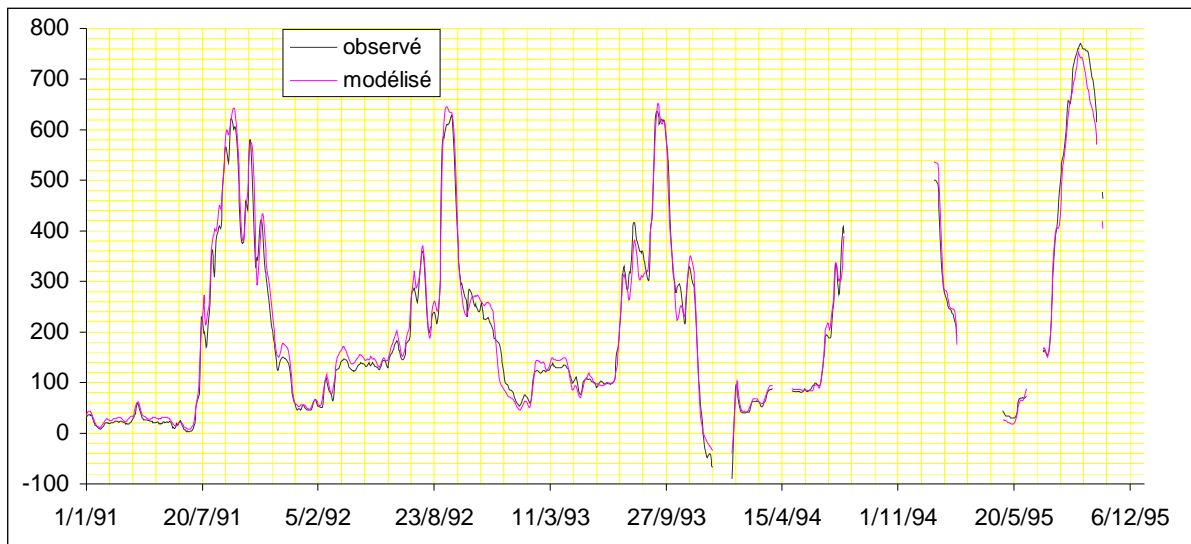
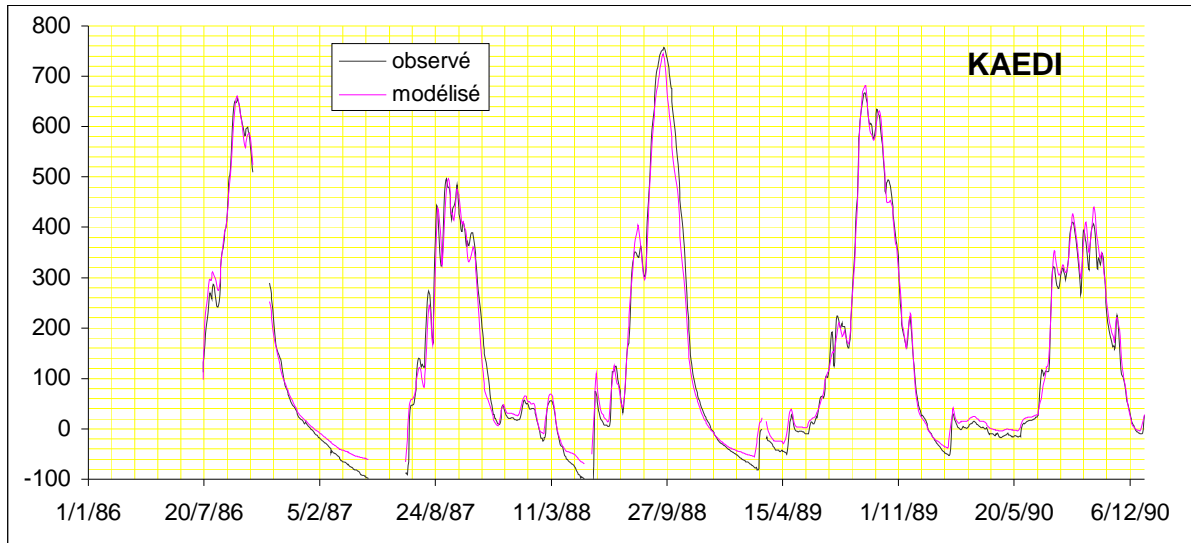


figure 11 : cote à l'échelle de Kaedi. Valeurs observées et valeurs modélisées avec COREDIAM (programme LIMDIAM) version 1999, à partir de Bakel (moyenne mobile sur 9 jours) et Diama observés

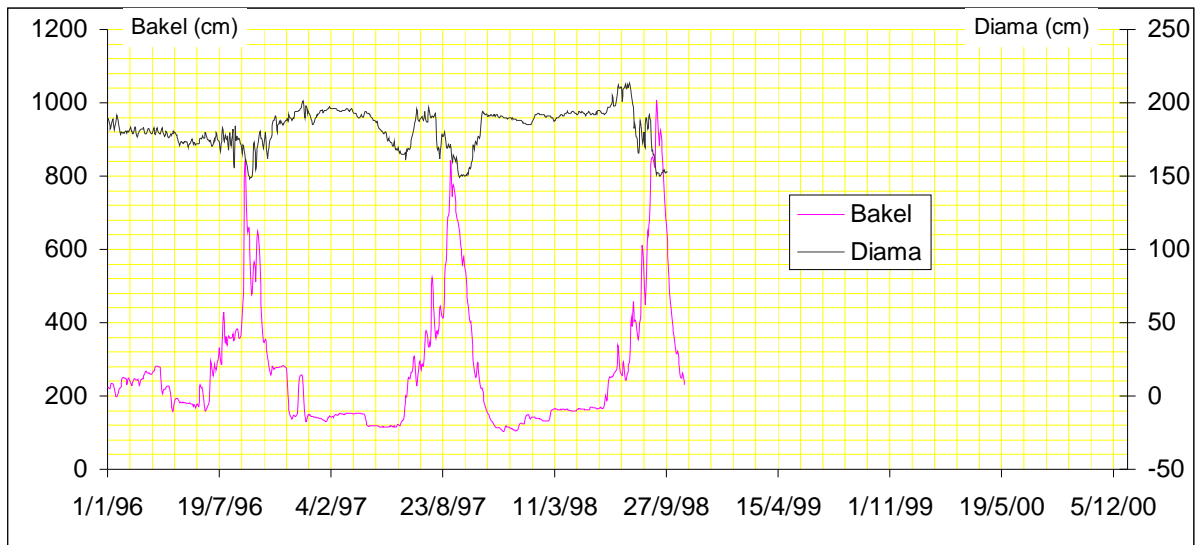
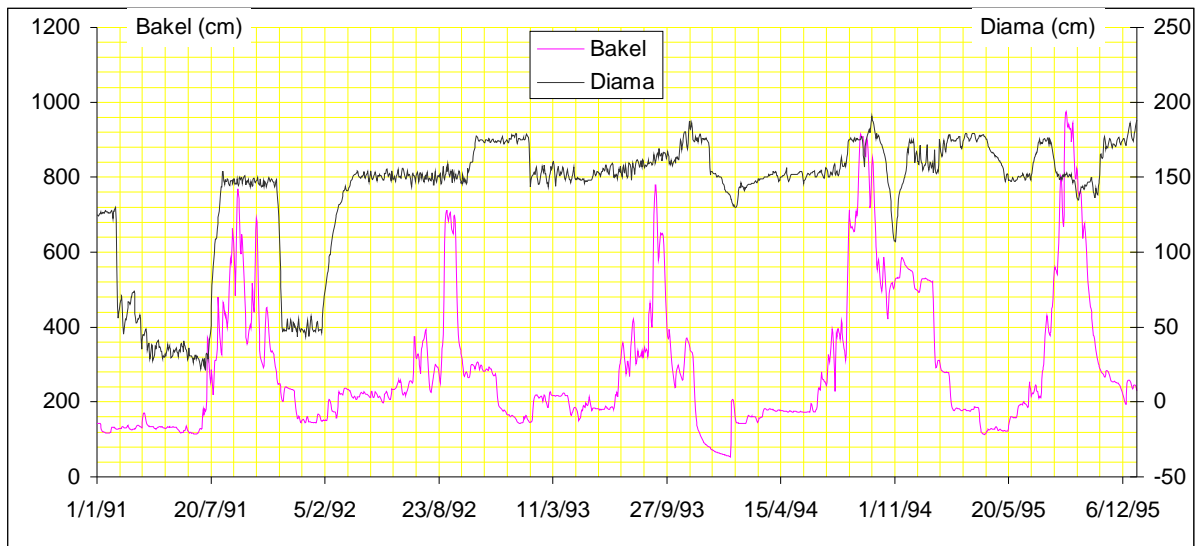
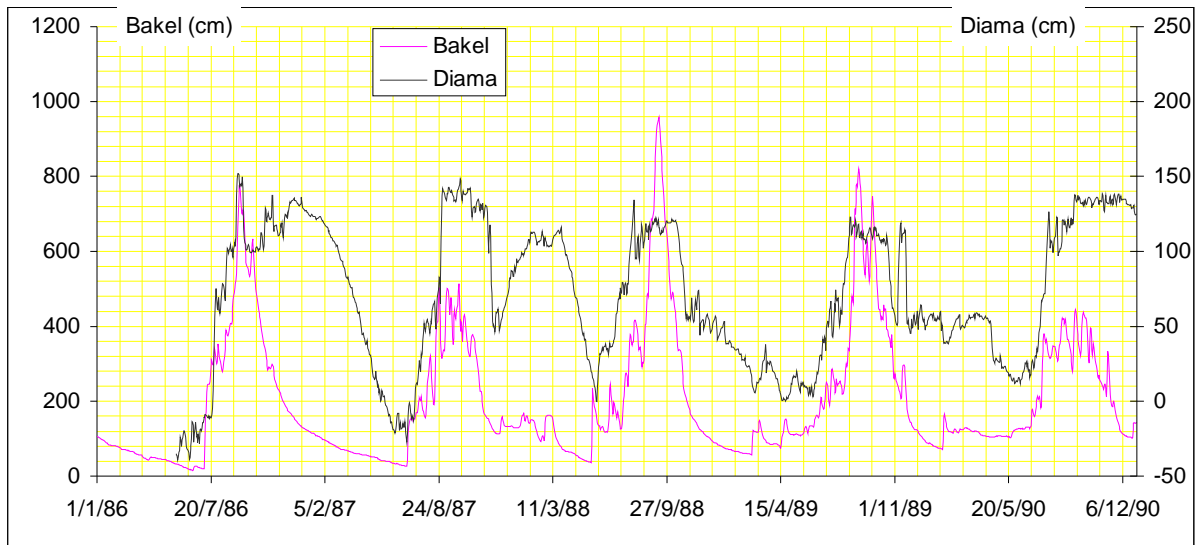


figure 12 : cote IGN à Diama, et cote à l'échelle de Bakel. Valeurs observées sur la période 1986-1998

ANNEXE 3.3

COUT EN EAU DU SOUTIEN DE CRUE DANS LE FLEUVE SENEGAL, EN FONCTION DE L'HYDRAULICITE DES MOIS D'AOÛT, SEPTEMBRE ET OCTOBRE.

RESUME ET CONCLUSION

Il est impossible actuellement de prévoir assez précisément, 10 jours à l'avance, les écoulements sur les rivières Bakoye et Falémé. De ce fait, on n'est pas en mesure de caler le soutien de crue opéré depuis le barrage de Manantali, pour pouvoir le faire coïncider avec une pointe de crue de ces affluents non contrôlés. Le soutien de crue est donc effectué à une date fixe optimale, déterminée sur la base des écoulements observés depuis 1950.

Pour ne pas trop pénaliser les autres objectifs assignés à l'ouvrage, le soutien de crue ne doit pas faire baisser le stock d'eau emmagasiné dans la retenue jusqu'à une valeur trop faible. L'option envisagée pour le moment consiste donc à le déclencher au 20 août si, et seulement si, le niveau de la surface libre du lac de Manantali se situe à cette date au dessus d'un seuil prédéterminé. Cette solution ne permet cependant pas d'écarter complètement les risques d'une décision à contresens. En effet, l'impact du soutien de crue sur la satisfaction des autres objectifs est essentiellement lié au stock d'eau disponible dans la retenue à la fin du soutien. Or ce stock dépend non seulement du stock disponible au début du soutien de crue, mais aussi du déstockage net effectué pendant ce dernier. Ce déstockage est malheureusement inconnu au moment de prendre la décision.

On montre ici que le déstockage net entraîné par le soutien de crue est fortement dépendant du stock initial dans la retenue, et du volume écoulé en régime naturel à Bakel pendant la durée du soutien. Les relations mises en évidence permettent d'estimer avec une erreur type de $0,510 \text{ km}^3$, le déstockage sur la période du 20 août au 31 octobre à partir du stock disponible au 20 août et du volume écoulé en septembre et octobre en régime naturel à Bakel. Quant à lui, le déstockage sur la période du 1^{er} août au 31 octobre peut être estimé, avec une erreur type de $0,402 \text{ km}^3$, à partir du stock disponible au 1^{er} août et du volume écoulé en août, septembre et octobre en régime naturel à Bakel.

On voit donc qu'une prévision du volume écoulé en régime naturel à Bakel durant les mois d'août, septembre et octobre, permettrait d'effectuer à l'avance une assez bonne estimation du stock disponible dans la retenue à la fin du soutien de crue. Au lieu d'utiliser la valeur du stock initial, on pourrait alors utiliser de façon beaucoup plus judicieuse celle du stock final prévu, pour juger chaque année de l'opportunité d'effectuer ou non le soutien de crue. De plus, la décision pourrait être prise dès le début du mois d'août, ce qui laisserait le temps de prévenir les populations et les différents services concernés.

Depuis peu, les météorologues sont capables de produire 4 mois à l'avance, un indice caractérisant l'abondance de la pluviométrie mensuelle prévue sur l'Afrique de l'Ouest. On peut raisonnablement espérer qu'un tel indice, s'il est fiable, devrait permettre de prévoir les volumes écoulés mensuellement en régime naturel sur le haut bassin du Sénégal au même horizon de temps. Une étude approfondie est cependant nécessaire pour le démontrer. L'estimation du stock final dans la retenue à partir des écoulements mensuels, ébauchée dans cette note, devra également être approfondie.

CONTEXTE

Le soutien de crue réalisé à partir du barrage de Manantali vise à garantir, pour l'agriculture traditionnelle de décrue et le maintien d'un certain équilibre écologique, une inondation annuelle suffisante du lit majeur dans la vallée du fleuve Sénégal. Il consiste à lâcher suffisamment d'eau pour obtenir au niveau de Bakel, un débit supérieur ou égal à un hydrogramme objectif de crue prédéfini, s'étalant sur environ un mois et demi. Deux options ont été envisagées pour opérer ce soutien en pénalisant au minimum les autres objectifs assignés à l'ouvrage (production d'électricité, soutien d'étiage pour l'agriculture irriguée et la navigation) :

La première option consiste à caler chaque année la date du soutien de crue pour faire coïncider au mieux ce dernier avec une pointe de crue importante des affluents non contrôlés. L'hydrogramme objectif peut alors être atteint en lâchant un minimum d'eau. En outre, il est possible de ne pas effectuer le soutien de crue lorsque celui-ci se solderait par une dépense en eau excessive à partir du barrage. Malheureusement, cette option nécessite une prévision assez précise des écoulements du Bakoye et de la Falémé, au moins 10 jours à l'avance. Aucun modèle n'ayant pu être mis au point à ce jour à partir des données hydro-météorologiques existantes pour effectuer cette prévision, cette voie est pour l'instant abandonnée.

L'option qui est actuellement retenue consiste à positionner l'hydrogramme objectif sur une date fixe, déterminée de façon à entraîner en moyenne un minimum de volume lâché. Le soutien de crue n'est alors réalisé que si le stock observé dans le lac à la date de son déclenchement (20 août), est supérieur à un seuil fixé à l'avance. On ne vise donc plus ici à lâcher le moins d'eau possible pour faire le soutien de crue, mais seulement à limiter les risques d'épuisement de la réserve. Cette solution ne pose aucun problème dans la plupart des cas, en particulier quand la réserve disponible est soit très grande, soit très faible au moment de déclencher le soutien. Par contre elle peut parfois s'avérer non optimale dans le cas d'un stock moyen, proche du seuil évoqué ci-dessus. En effet, on ne peut alors écarter complètement le risque d'une décision inopportune concernant la réalisation, ou non, du soutien de crue :

- Le soutien de crue peut être abandonné pour cause de réserve jugée insuffisante, alors qu'on constate après coup que grâce à une hydraulité excédentaire de l'année en question on aurait pu le réaliser tout en augmentant le stock disponible dans la retenue.
- Inversement, un soutien de crue réalisé à partir d'un stock assez moyen peut entraîner une grave diminution de la réserve s'il est réalisé lors d'une année à très faibles apports. Dans les cas les plus graves il se peut même que le soutien de crue, une fois déclenché, ne puisse être mené à terme du fait de l'épuisement total de la réserve utile du barrage.

Comme on le voit, les risques de réaliser ou non le soutien de crue à mauvais escient sont dus à la méconnaissance globale des apports qui vont se présenter pendant le soutien.

OBJECTIF

Si la décision du soutien de crue repose pour le moment sur le stock disponible dans la retenue au début du soutien (20 août), c'est parce qu'on est réduit à gérer le barrage de Manantali face à un avenir inconnu. Or, le paramètre essentiel qui conditionne la production ultérieure d'énergie et le soutien d'étiage n'est pas le stock disponible au début, mais à la fin du soutien de crue (mi-octobre). Il serait donc beaucoup plus judicieux d'adopter ce dernier comme critère de décision .

Les météorologues sont aujourd'hui en mesure d'évaluer, 4 mois à l'avance, un indice décrivant l'abondance des précipitations mensuelles sur l'Afrique de l'Ouest. On entrevoit donc la possibilité d'effectuer, début août par exemple, une prévision du stock d'eau disponible dans la retenue à la fin du soutien de crue. Pour pouvoir faire cette prévision, on devra au préalable mettre au point et valider les trois procédures suivantes :

- L'indice d'abondance des précipitations devra être traduit en lames d'eau mensuelles précipitées au sol.

- Les lames d'eau précipitées au sol devront être traduites en volumes écoulés mensuels à certains points du réseau hydrographique du haut bassin du Sénégal : modèle pluie-débit..
- Le déstockage net dans la retenue devra enfin être estimé à partir des volumes écoulés mensuels.

La présente note concerne la troisième procédure, pour laquelle on teste une solution simple. Celle-ci consisterait à évaluer le déstockage entraîné dans la retenue par le soutien de crue, uniquement à partir des volumes écoulés estimés à la station de Bakel en régime naturel.

METHODE

Débits naturels du Sénégal à Bakel et du Bafing à Soukoutali

Les débits naturels du Bafing à Soukoutali sont obtenus jusque 1983 à partir des cotes observées, complétées essentiellement à partir de Daka Saidou. A partir de 1984, ils sont intégralement reconstitués, essentiellement à partir de Daka Saidou jusque 1994, puis à partir de Makana depuis 1995.

Jusque fin 1986, les débits naturels du Sénégal à Bakel correspondent aux valeurs observées à cette station. A partir de 1987, ils sont intégralement reconstitués, de deux façons différentes.

- Première méthode : par modèle de propagation de crue de type JPL, à partir des débits naturels de Soukoutali, Oualia et Gourbassy.
- Deuxième méthode : par bilan de volume écoulé, à partir des débits observés à Bakel et à la sortie du barrage, et du débit naturel à Soukoutali. On adopte un temps de propagation constant de 3 jours entre Manantali et Bakel :

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

Les débits reconstitués par la première méthode sont conservés pour des valeurs inférieures à 800 m³/s. Le reste du temps, on adopte les valeurs obtenues avec la seconde méthode.

Calcul du déstockage provoqué dans la retenue par le soutien de crue

La gestion du barrage de Manantali est simulée numériquement au pas de temps journalier sur la période 1950-1998. Les calculs sont effectués sur tableur Excel en considérant un mode de gestion simplifié où n'interviennent que les consignes suivantes :

- Produire de l'énergie électrique. Si le niveau du lac se situe en dessous du seuil S1 (=192 m), le calcul du débit à lâcher ne tient pas compte de la production d'énergie. S'il se situe entre S1 et S2 (=202 m) on lâche au moins un débit Qe permettant de produire la puissance P (=90 Mw). S'il se situe au dessus de S2, on lâche au moins un débit Qe permettant de produire la puissance Pmax (=205 Mw).
- Lâcher un débit Qtp suffisant pour obtenir à Bakel un débit supérieur ou égal à Qet=150 m³/s (soutien d'étiage).
- Lâcher un débit Qtp suffisant pour obtenir à Bakel un débit supérieur ou égal à l'hydrogramme "ORSTOM1" pendant la crue (Qc = 0 m³/s le 22 août ; 2500 le 28 août ; 2500 le 2 septembre ; 0 le 16 octobre).
- Lâcher un débit Qs suffisant pour maintenir la surface libre du lac en dessous de la cote 210,50 m.

La seule contrainte de gestion prise en compte concerne le débit minimal Qmino évacué par l'ouvrage. Il s'agit du débit obtenu lorsqu'aucun débit ne passe ni par les turbines ni par la vidange de fond, et que les vannes de l'évacuateur de crue sont ouvertes au minimum. Ce débit est nul lorsque le niveau du lac se situe en dessous de la cote 208,05 m.

Les calculs sont effectués avec les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Pertes par évaporation sur la retenue : négligées ;
- Rendement des turbines constant, égal à 0,9 ;
- La cote Hav de la surface libre à l'aval du barrage est reliée au débit lâché Qlâché (m³/s) par :

$$Hav = 153,85 + 0,0027 * Qlâché$$

(relation établie pour les débits inférieurs à 1700 m³/s, et admise pour les autres)

- Temps de propagation constant entre Manantali et Bakel, égal à 3 jours.

Avec la dernière hypothèse, le débit Qtp(j) à lâcher le jour j pour obtenir le débit objectif Qbp(j+3) à Bakel au jour j+3, peut être calculé simplement de la façon suivante, en notant Qsou et Qbak les débits naturel du Bafing à Soukoutali et du Sénégal à Bakel respectivement :

$$Qtp(j) = Qsou(j) + Qbp(j+3) - Qbak(j+3)$$

Les simulations effectuées suivant ces principes permettent d'évaluer le déstockage net De (volume stocké initial moins volume stocké final) dans la retenue entre une date initiale D1 et une date finale D2. Alors que la date D2 est fixée au 31 octobre, deux valeurs sont testées pour D1 : le 1^{er} août et le 20 août. Chaque simulation est effectuée sur la période 1950-1998 en imposant chaque année une même valeur fixe pour le volume initial Vi stocké dans la retenue à la date D1. Dix valeurs différentes, allant de 3,86 km³ (cote 188 m) à 10,38 km³ (cote 206 m) sont prises en compte pour Vi dans les résultats présentés ci-dessous.

RESULTATS

On constate que le déstockage net De dans la retenue entre la date D1 (= 1^{er} août ou 20 août) et la date D2 (= 31 octobre) est relié de façon assez étroite au volume Vi stocké dans la retenue à la date D1, et au volume écoulé V à Bakel en régime naturel durant les mois séparant les dates D1 et D2.

1^{er} cas étudié : D1 = 1^{er} août

Le volume V correspond dans ce cas à l'écoulement naturel du Sénégal à Bakel durant les mois de août, septembre et octobre. La figure 1 montre les relations obtenues entre V et De sur un échantillon de 48 couples, pour chaque valeur de Vi testée. Ces relations peuvent être décrites de la façon suivante :

- Pour un volume initial Vi inférieur à 5,78 km³ dans la retenue au 1^{er} août :

$$De = A * \text{Log}_n (V*1000) + B \quad (R^2 \text{ compris entre } 0,9669 \text{ et } 0,9688)$$

- Pour Vi supérieur ou égal à 5,78 km³ dans la retenue au 1^{er} août :

$$De = (C * V^3 + D * V^2 + E * V + F) / 1000 \quad (R^2 \text{ compris entre } 0,9542 \text{ et } 0,9766)$$

Pour des valeurs de De, V et Vi exprimées en km³, la figure 2 montre que les paramètres A, B, C, D, E et F peuvent être reliés au volume initial Vi par les relations suivantes :

$$A = 0,049683 * Vi^2 + 0,0086846 * Vi - 6,5912 \quad (R^2 = 1,0000)$$

$$B = - 0,44128 * Vi^2 - 0,096489 * Vi + 58,589 \quad (R^2 = 0,9999)$$

$$C = - 0,0092502 * Vi^3 + 0,17688 * Vi^2 - 1,0810 * Vi + 1,6814 \quad (R^2 = 0,9693)$$

$$D = 0,44103 * Vi^3 - 8,2799 * Vi^2 + 49,206 * Vi - 52,497 \quad (R^2 = 0,9573)$$

$$E = - 3,6958 * Vi^3 + 53,404 * Vi^2 - 143,73 * Vi - 1517,5 \quad (R^2 = 0,8887)$$

$$F = - 38,528 * Vi^3 + 1119,3 * Vi^2 - 10053 * Vi + 35679 \quad (R^2 = 0,9378)$$

Les relations décrites ci-dessus permettent donc d'estimer le déstockage De simplement à partir du volume initial V_i stocké et du volume écoulé naturel V à Bakel. Avec une erreur quadratique moyenne de $0,402 \text{ km}^3$ sur un échantillon de 480 valeurs ainsi reconstituées, cette estimation offre une précision assez satisfaisante, comme le montre la figure 3.

2eme cas étudié : D1 = 20 août

Le volume V correspond cette fois à l'écoulement naturel du Sénégal à Bakel durant les mois de septembre et octobre uniquement. La figure 4 montre les relations obtenues entre V et De sur un échantillon de 49 couples, pour chaque valeur de V_i testée. Ces relations peuvent être décrites de la façon suivante :

- Pour un volume initial inférieur à $6,42 \text{ km}^3$ dans la retenue au 20 août :

$$De = A * \text{Log}_n (V * 1000) + B \quad (R^2 \text{ compris entre } 0,9377 \text{ et } 0,9497)$$

- Pour V_i supérieur à $6,42 \text{ km}^3$:

$$De = (C * V^3 + D * V^2 + E * V + F) / 1000 \quad (R^2 \text{ compris entre } 0,9480 \text{ et } 0,9669)$$

Pour des valeurs de De , V et V_i exprimées en km^3 , la figure 5 montre que les paramètres A , B , C , D , E et F peuvent être reliés au volume initial V_i par les relations suivantes :

$$A = 0,35089 * V_i - 6,6984 \quad (R^2 = 0,9991)$$

$$B = - 2,9397 * V_i + 57,184 \quad (R^2 = 0,9988)$$

$$C = (0,018916 * V_i^3 - 0,58923 * V_i^2 + 5,7442 * V_i - 19,178) \quad (R^2 = 0,9927)$$

$$D = (-1,0339 * V_i^3 + 30,198 * V_i^2 - 282,06 * V_i + 929,57) \quad (R^2 = 0,9979)$$

$$E = (15,657 * V_i^3 - 437,91 * V_i^2 + 4011,3 * V_i - 13660) \quad (R^2 = 0,9984)$$

$$F = (- 63,739 * V_i^3 + 1775,9 * V_i^2 - 16111 * V_i + 54828) \quad (R^2 = 0,9761)$$

Cette fois encore, les relations décrites ci-dessus permettent d'estimer le déstockage De simplement à partir du volume initial V_i stocké et du volume écoulé naturel V à Bakel. Avec une erreur quadratique moyenne de $0,510 \text{ km}^3$ sur un échantillon de 490 valeurs, cette estimation offre une précision assez satisfaisante, comme le montre la figure 6.

NOTATIONS UTILISEES :

A , B , C , D , E , F : paramètres des relations entre De et V

$D1$: date marquant le début de la période sur laquelle on calcule le déstockage dans la retenue

$D2$: date marquant la fin de la période sur laquelle on calcule le déstockage dans la retenue

De : déstockage net dans la retenue (volume initial moins volume final), entre les dates $D1$ et $D2$

P : puissance électrique que l'on vise à produire quand la surface libre du lac se situe entre les cotes $S1$ et $S2$

P_{max} : puissance maximale productible par le barrage

Q_{bak} : débit naturel du Sénégal à Bakel

Q_{bp} : débit objectif pour le Sénégal à Bakel

Q_c : débit objectif pour le Sénégal à Bakel, en période de crue

Q_e : valeur minimale de débit lâché du barrage, permettant de satisfaire la consigne de production d'électricité.

Q_{et} : débit objectif pour le Sénégal à Bakel, en période d'étiage

Q_{mino} : débit évacué par le déversoir de crue lorsque ses vannes sont ouvertes au minimum

Q_s : valeur minimale de débit à lâcher du barrage pour maintenir la surface libre du lac en dessous de la cote $210,50 \text{ m}$.

Q_{sou} : débit naturel du Bafing à Soukoutali (station anciennement située à l'emplacement du barrage)

Q_{tp} : valeur de débit lâché du barrage permettant de faire coïncider le débit du Sénégal à Bakel avec un hydrogramme objectif prédéfini.

S1 : cote de la surface libre du lac, en dessous de laquelle la consigne de production d'électricité n'est pas prise en compte pour calculer le débit à lâcher du barrage

S2 : cote de la surface libre du lac, au dessus de laquelle on vise à produire la puissance P_{max}

V : volume écoulé dans le fleuve Sénégal à Bakel, durant les mois de août, septembre et octobre (si D1 = 1^{er} août) ou septembre et octobre (si D1 = 20 août)

V_i : volume initial stocké dans la retenue à la date D1

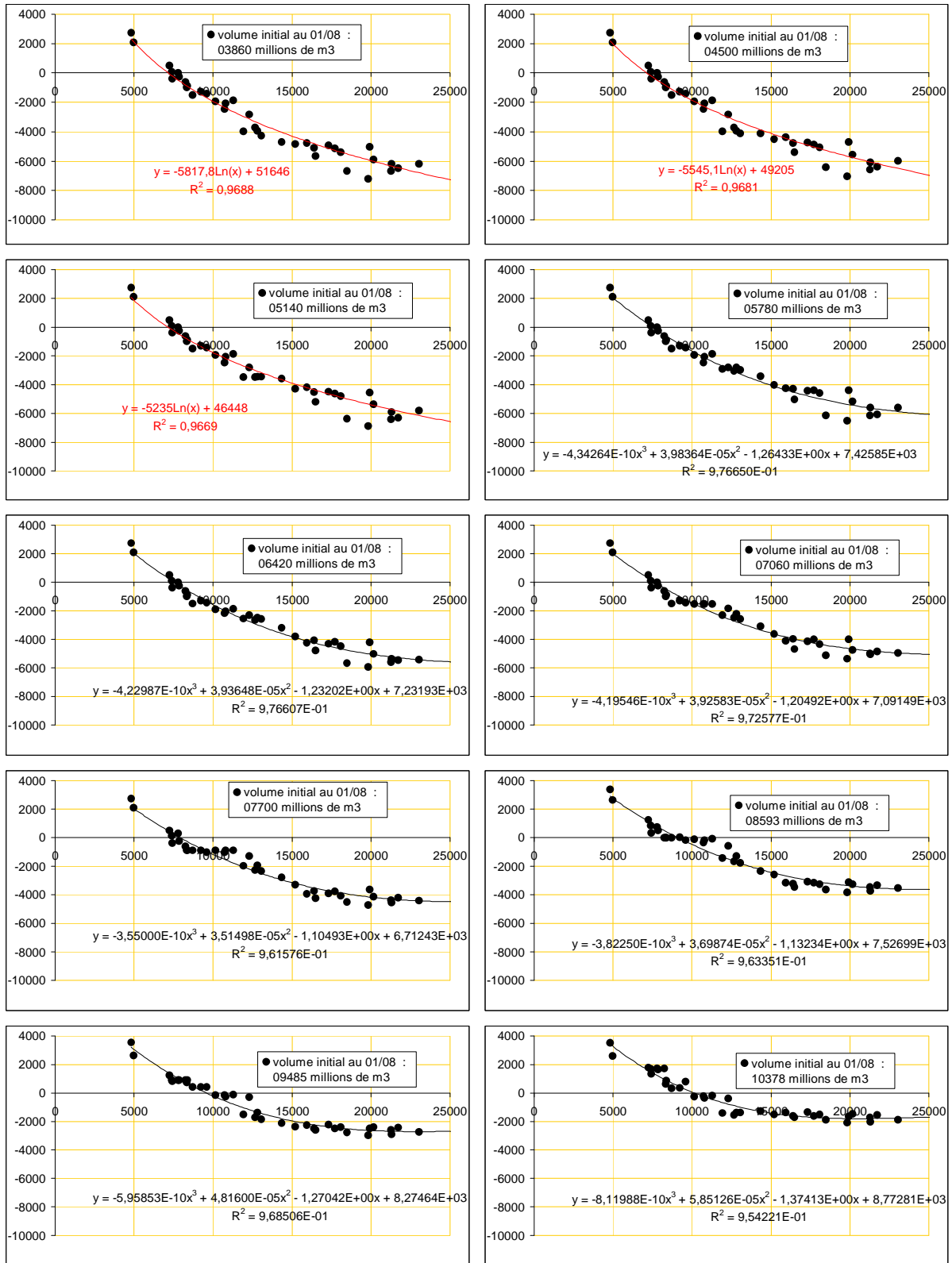


figure 1 : Déstockage net dans la retenue (De : ordonnée en millions de m³) entre le 1er août et le 31 octobre, en fonction du volume naturel écoulé à Bakel (V : abscisse en millions de m³) durant les mois de août, septembre et octobre, dans le cas d'un soutien de crue "ORSTOM1". Période 1950-1997.

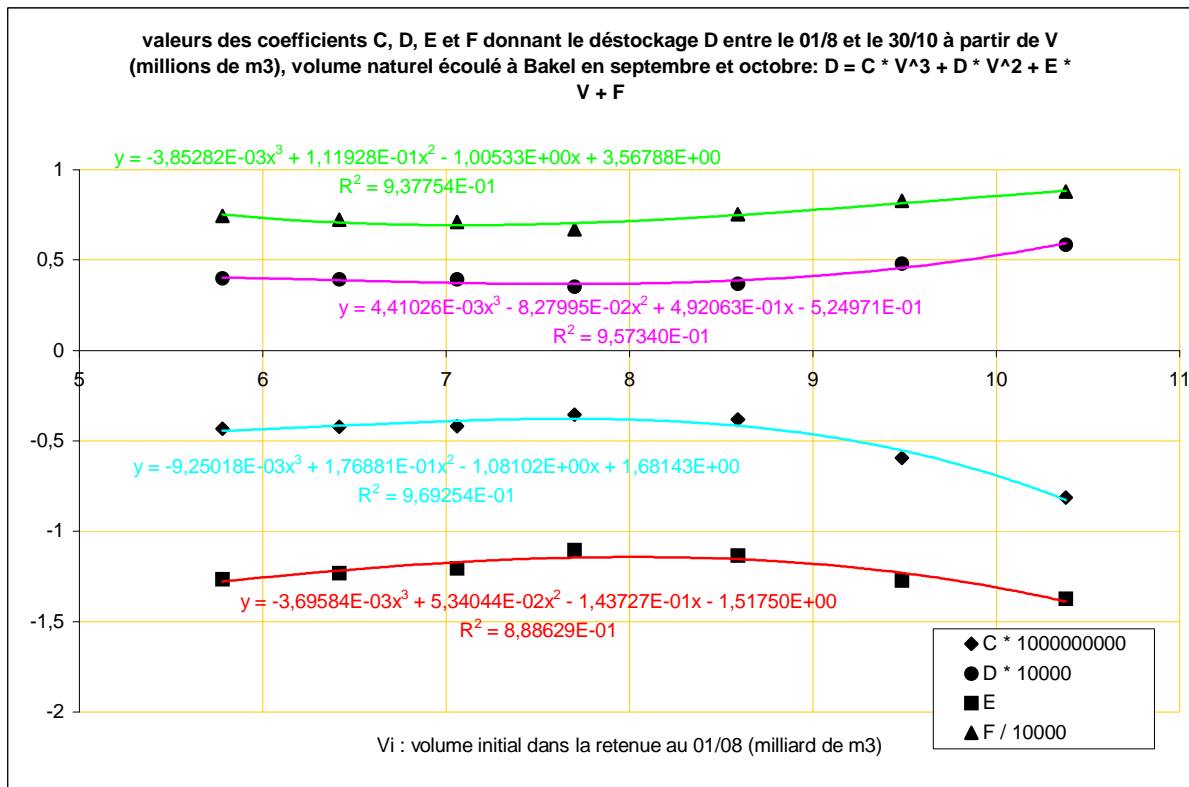
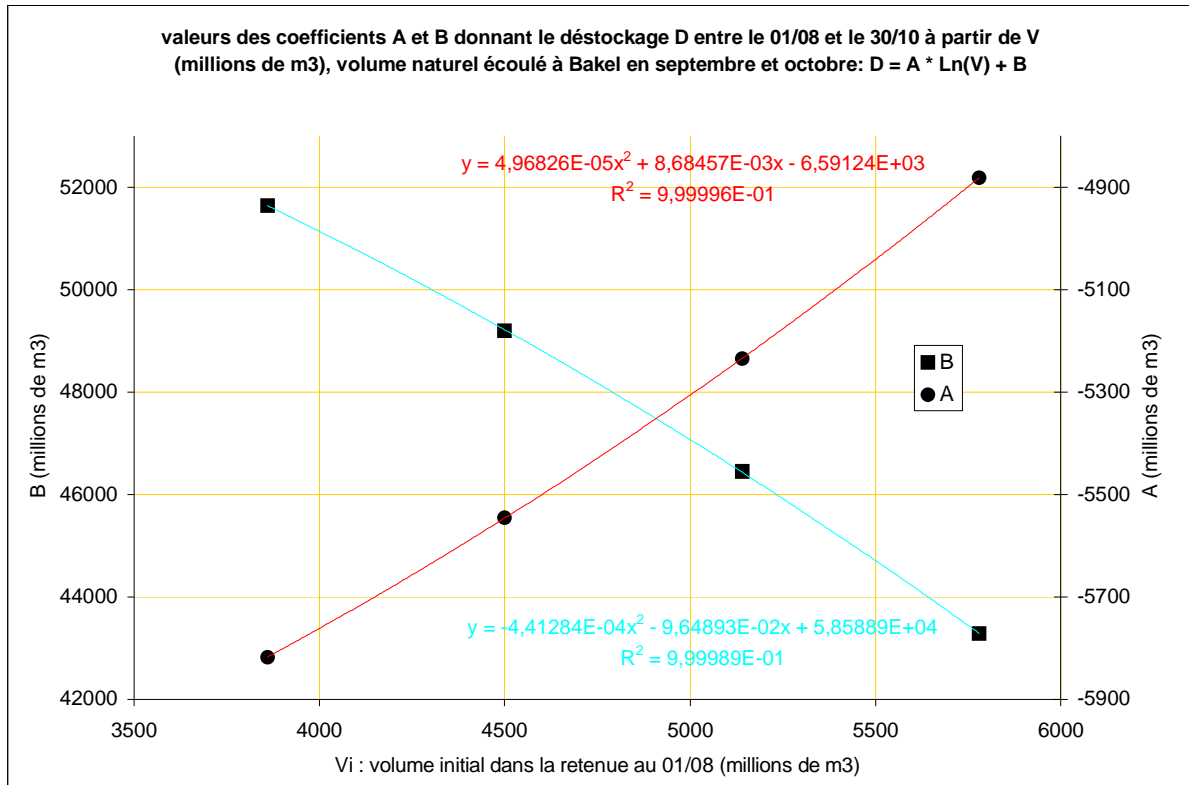


figure 2 : Relations permettant de déterminer, à partir du volume initial V_i dans la retenue au 1er août, les valeurs des coefficients A, B, C, D, E et F donnant le déstockage D_e entre le 1er août et le 31/10 en fonction du volume naturel écoulé V à Bakel en août, septembre et octobre.

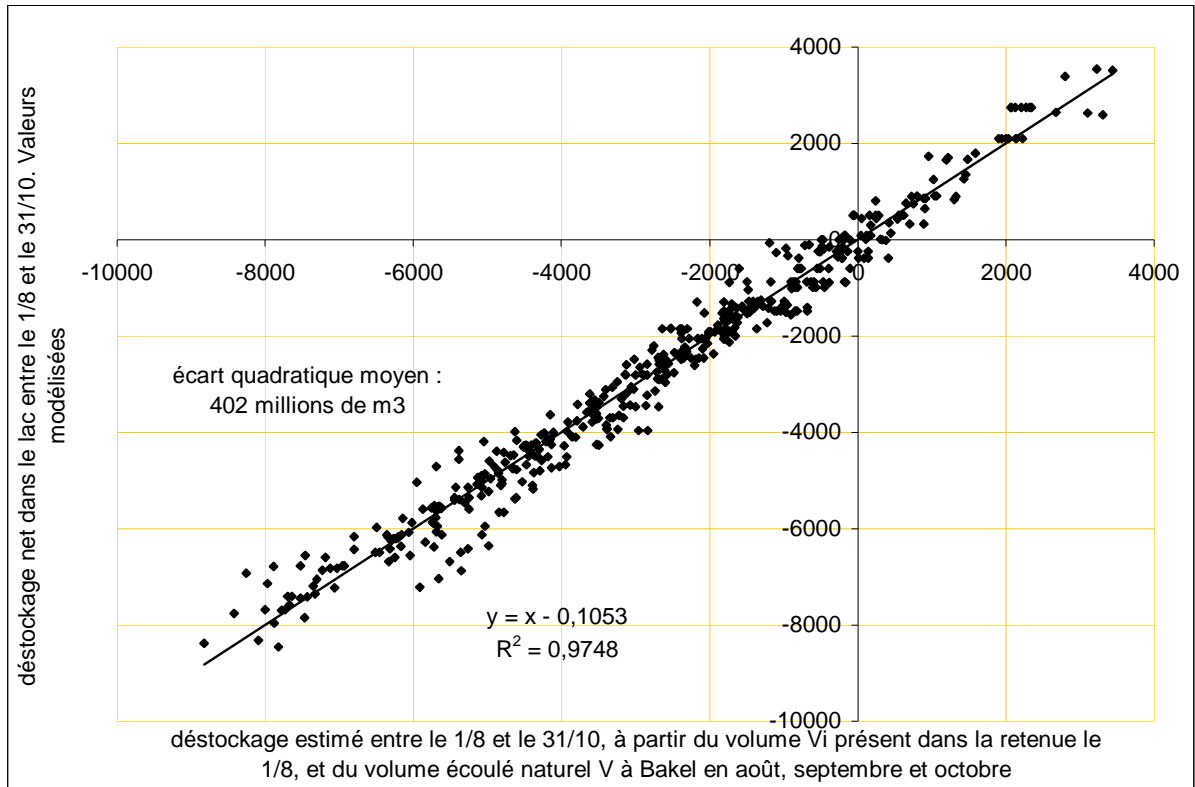


figure 3 : Déstockage net D_e dans le lac entre le 1er août et le 31/10 dans le cas d'un soutien de crue de type "ORSTOM1", sur la période 1950-1997. Relation entre les valeurs modélisées et les valeurs estimées à partir du volume initial V_i stocké au 1er août et du volume naturel V écoulé à Bakel en août, septembre et octobre

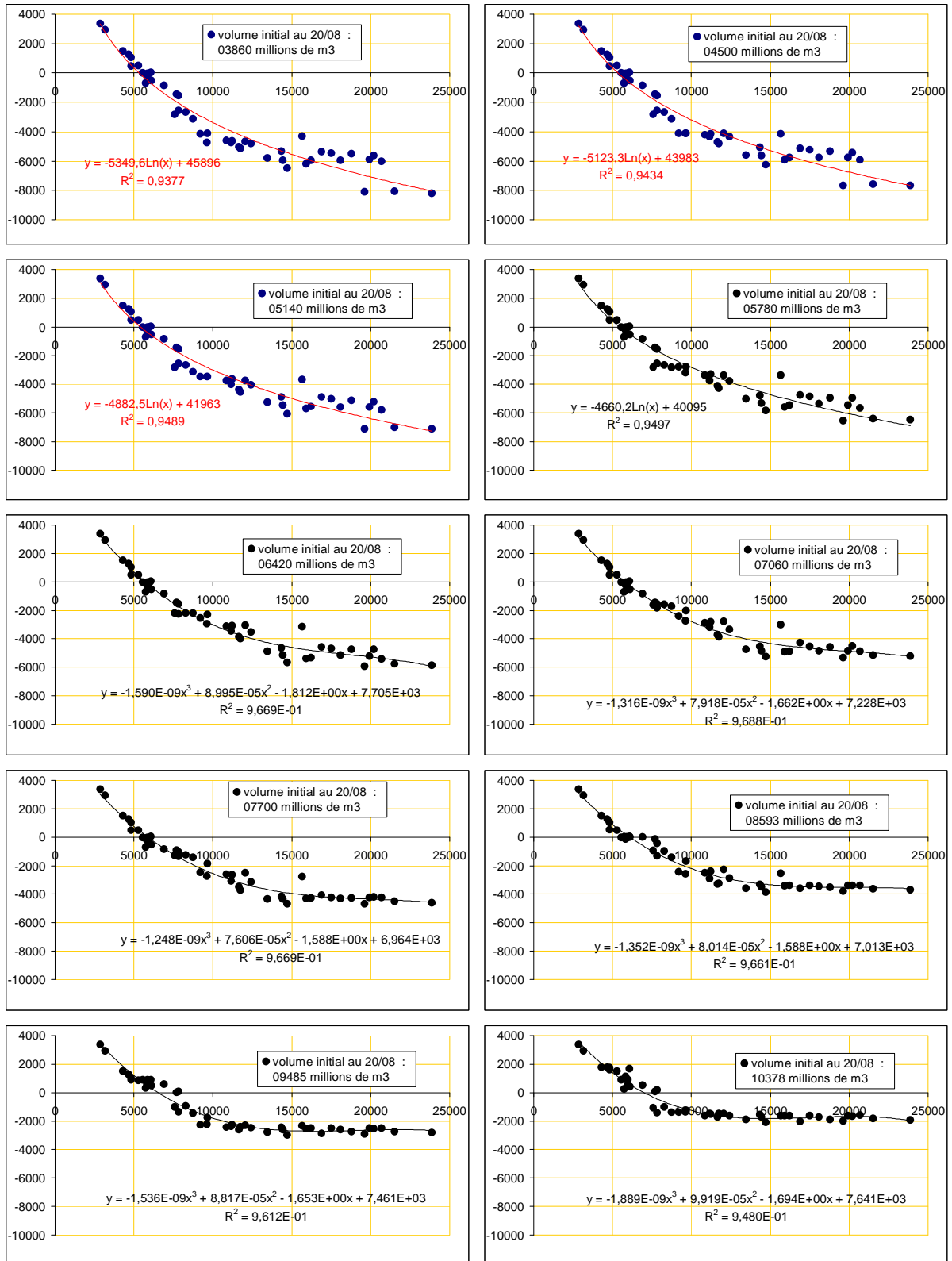


figure 4 : Déstockage dans la retenue (De : ordonnée en millions de m3) entre le 20 août et le 31 octobre, en fonction du volume naturel écoulé à Bakel (V : abscisse en millions de m3) durant les mois de septembre et octobre, dans le cas d'un soutien de crue "ORSTOM1". Période 1950-1998.

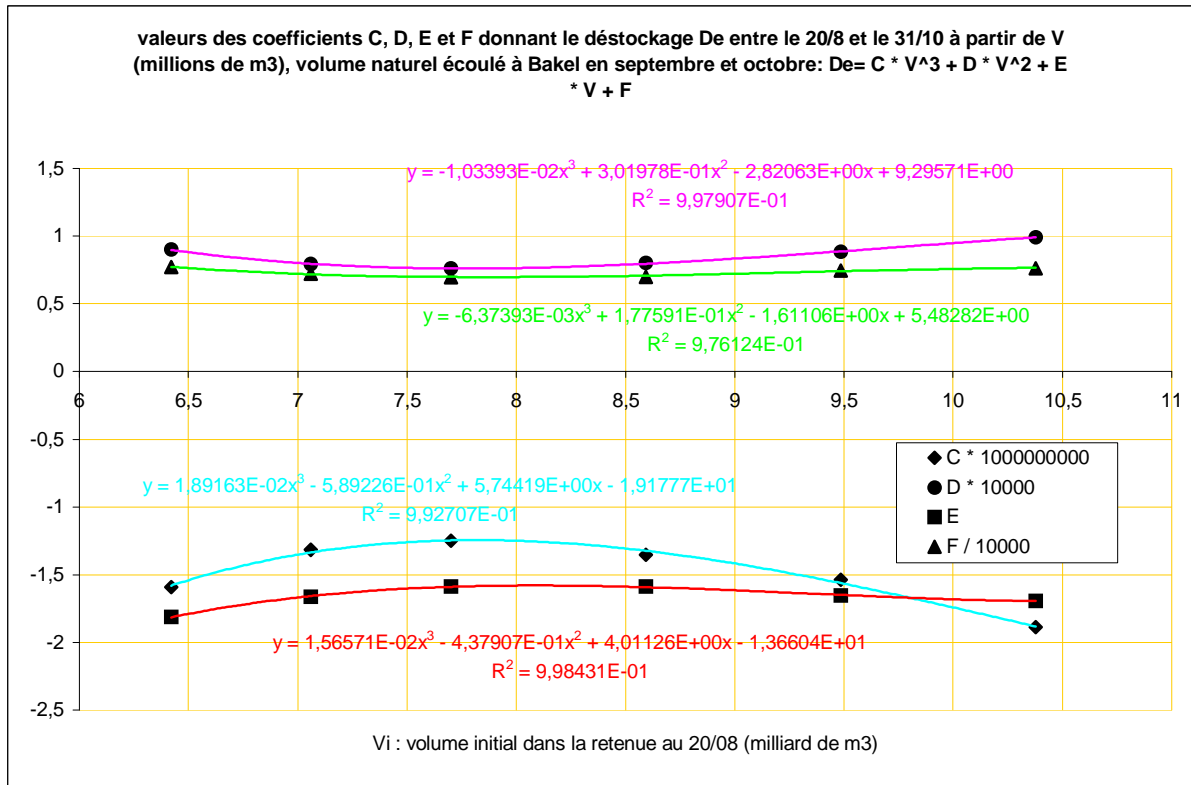
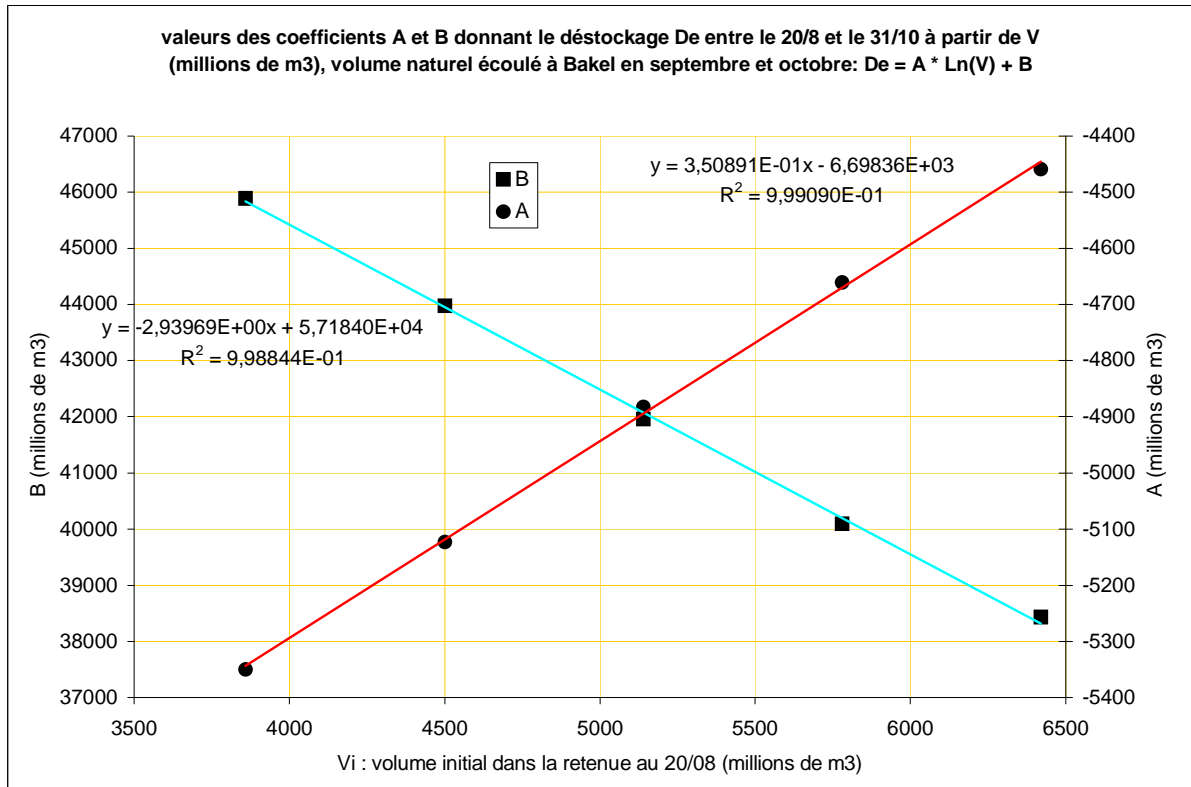


figure 5 : Relations permettant de déterminer, à partir du volume initial V_i dans la retenue au 20/8, les valeurs des coefficients A, B, C, D, E et F donnant le déstockage De entre le 20/8 et le 31/10 en fonction du volume naturel V écoulé à Bakel en septembre et octobre.

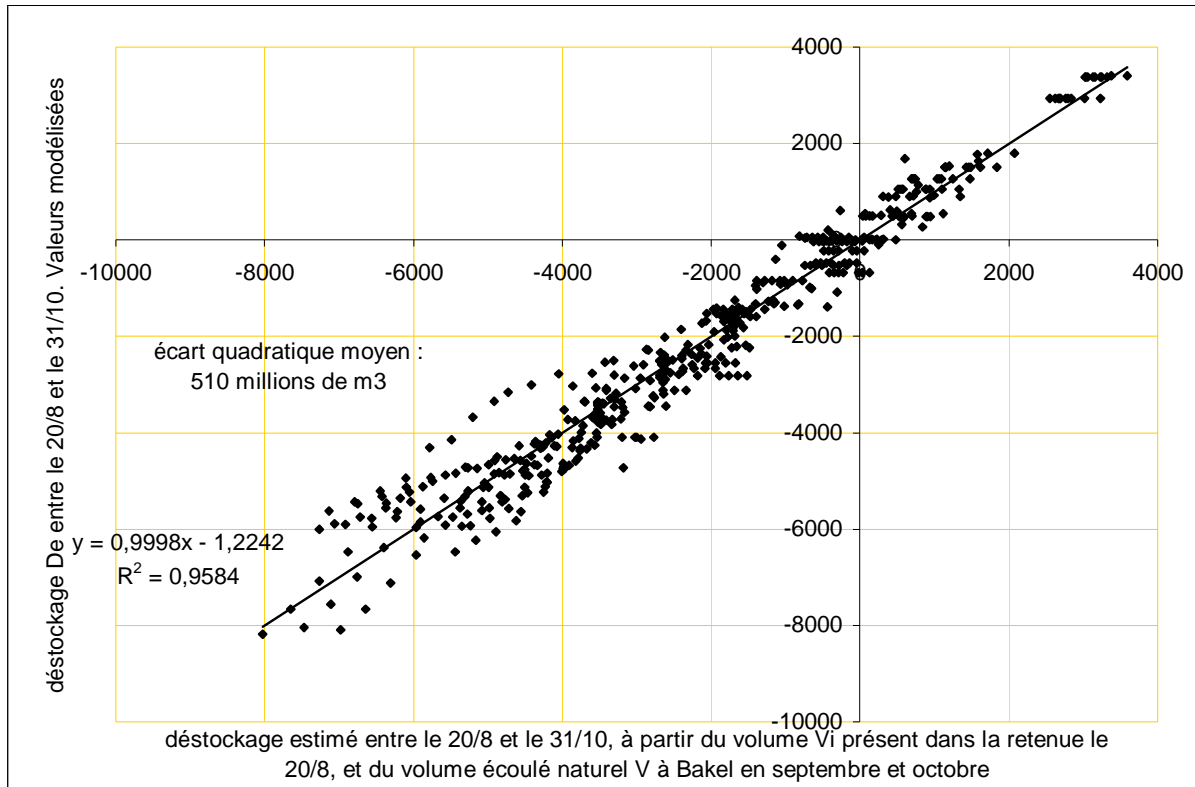


figure 6 : Déstockage net D_e dans le lac entre le 20/8 et le 31/10 dans le cas d'un soutien de crue de type "ORSTOM1", sur la période 1950-1998. Relation entre les valeurs modélisées et les valeurs estimées à partir du volume initial V_i stocké au 20/8 et du volume naturel V écoulé à Bakel en septembre et octobre.

ANNEXE 3.4

GESTION PRECONISEE LORSQUE LA RESERVE DISPONIBLE DANS LA RETENUE DE MANANTALI NE PERMET PAS DE SOUTENIR LA CRUE DU FLEUVE SENEGAL

Résumé et conclusion

Il est rappelé pour quelles raisons le soutien des crues du fleuve Sénégal ne peut pas être réalisé tous les ans :

- le soutien est physiquement impossible dans certains cas (succession d'années déficitaires en eau), du fait de la capacité insuffisante du réservoir de Manantali ;
- le soutien trop fréquent induit une gestion basse de la retenue, qui grève la production d'énergie.

Il est préconisé de ne réaliser le soutien de crue que lorsque la réserve disponible dans la retenue dépasse un seuil minimal prédéfini, à la date fixe de déclenchement du soutien. Lors des années où le soutien de crue n'est pas réalisé, deux options sont proposées :

- l'option 1 consiste à stocker l'eau qui n'aurait été déversé qu'aux seules fins du soutien de crue ;
- l'option 2 consiste à laisser passer la crue naturelle pendant toute la durée théorique du soutien.

On considère les 31 scénarios de gestion optimaux déterminés dans le manuel provisoire de gestion de Manantali, qui pour un soutien d'étiage et une production moyenne d'énergie donnés, offrent les plus fortes fréquences de crues correctement soutenues. Ces scénarios, simulés dans le manuel avec l'option 1 concernant les cas d'absence de soutien de crue, font l'objet d'une nouvelle simulation avec l'option 2.

La comparaison des résultats obtenus avec les deux options montre qu'en moyenne la première est nettement plus avantageuse que la deuxième, tant pour la production d'énergie que pour le soutien de crue. Le fait de laisser passer la crue naturelle en cas d'absence de soutien de crue, compromet la reconstitution du stock dans la retenue, ce qui se répercute défavorablement sur la production électrique et le soutien de crue des années suivantes.

Conclusion : lors des années où l'on ne fait pas de soutien de crue, il vaut mieux stocker l'eau qui aurait été dépensée pour le soutien, plutôt que laisser passer la crue naturelle.

Contexte

Le rapport "Programme d'optimisation de la gestion des réservoirs, phase 2, tome 2", publié par l'IRD en Mars 1999, montre dans son annexe 1 qu'un réservoir de $10,7 \text{ km}^3$ de capacité utile aurait été nécessaire à Manantali, pour pouvoir réaliser chaque année de 1970 à 1997, un soutien de crue de type "ORSTOM1" (palier à $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 6 jours) suivi d'un soutien d'étiage à $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Le même soutien de crue systématique, suivi d'un soutien d'étiage à 150 ou $200 \text{ m}^3/\text{s}$ aurait nécessité une capacité de 27,7 et $49,1 \text{ km}^3$ respectivement.

La tranche utile du réservoir de Manantali, située entre les cotes 187 et 208,05 m, correspond à un volume de $7,7 \text{ km}^3$. Il apparaît donc qu'une succession d'années déficitaires comme il s'en est produit entre 1970 et 1997, peut parfois entraîner l'impossibilité physique de réaliser à la fois le soutien de crue et le soutien d'étiage à partir du barrage.

Même quand la réserve est suffisante à Manantali pour réaliser le soutien de crue, celui-ci peut nécessiter des débits lâchés bien supérieurs à la capacité de turbinage des futurs groupe équipant le barrage, d'où il résulte une perte de production électrique. Lors des périodes déficitaires en eau, le soutien de crue apparaît en fait comme un objectif fortement concurrentiel par rapport à la production d'énergie et au soutien d'étiage.

Afin de satisfaire au mieux les différents objectifs assignés au barrage, la solution actuellement retenue pour le soutien de crue est la suivante :

- L'hydrogramme objectif est défini pour une date fixe, déterminée de façon à entraîner en moyenne un minimum de volume lâché du barrage. Ainsi, l'hydrogramme "ORSTOM1" (très proche de l'hydrogramme "Gibb A") est défini de la façon suivante à Bakel :
0 m³/s le 22 août ; 2500 le 28 août ; 2500 le 2 septembre ; 0 le 16 octobre
- Le soutien de crue n'est effectué que si, à la date de son déclenchement (20 août dans le cas de l'hydrogramme "ORSTOM1"), le niveau du lac de Manantali se situe au dessus d'un seuil Hs déterminé à l'avance.

Cette consigne de gestion conduit à ne pas faire le soutien de crue lors des années où le stock d'eau disponible à Manantali est faible au début de la crue. Ceci permet de limiter les risques d'un abaissement trop important de la réserve, très préjudiciable pour la production électrique.

Objectif

Pour la conduite à tenir lors des années où le soutien de crue n'est pas effectué, deux options ont été envisagées :

Option 1 : si le soutien de crue n'est pas déclenché, alors ne sont lâchés pendant la durée théorique de celui-ci, que les débits nécessaires pour le respect des autres consignes de gestion. Autrement dit, les volumes d'eau qui auraient dû être lâchés aux seules fins du soutien de crue sont conservés dans le barrage. La crue obtenue à Bakel, qui résulte alors pour l'essentiel des apports naturels du Bakoye et de la Falémé, a peu de chances d'atteindre une ampleur satisfaisante. Par contre, le volume soustrait à la crue naturelle du Bafing pour reconstituer le stock dans la retenue, bénéficie à la production électrique et au soutien d'étiage, mais également au soutien de crue de l'année suivante en contribuant à créer les conditions favorables à sa réalisation.

Option 2 : si le soutien de crue n'est pas déclenché, la consigne de soutien est alors simplement remplacée par une consigne de maintien du niveau dans le lac de Manantali. Autrement dit, on laisse sortir du barrage les débits qui entrent dans la retenue (aux pertes près), et l'objectif de crue visé par le soutien habituel est remplacé pendant toute sa durée théorique, par l'hydrogramme naturel qu'on obtiendrait en l'absence de barrage. La crue obtenue à Bakel a plus de chance d'être satisfaisante qu'avec l'option 1. Par contre, la reconstitution du stock dans la retenue est alors assez limitée, ce qui compromet les chances de pouvoir soutenir la crue suivante dans de bonnes conditions, et nuit à la production électrique et au soutien d'étiage.

Le but visé ici consiste à déterminer quelle est parmi ces deux options, celle qui permet de satisfaire au mieux les différents objectifs assignés au barrage.

Methode

RAPPEL DES RESULTATS PRECEDEMMENT OBTENUS AVEC L'OPTION 1

Le manuel des consignes de gestion (version provisoire) publié par l'IRD en Mars 1999 présente les résultats d'une simulation numérique de la gestion de Manantali, effectuée suivant différents scénarios de consignes envisageant tous l'option 1 pour le soutien de crue. Les consignes simulées, listées par ordre de priorité décroissante en utilisant les notations adoptées dans le manuel, sont les suivantes, :

- A1 : **Précaution contre la submersion des digues du barrage** : Hmax = 210,50 m
- A3 : **lâcher d'un débit sanitaire réservé** Qr de 10 m³/s
- B1 : **précaution contre l'affouillement de la partie basse du parement amont de l'ouvrage** : Hmin = 187 m
- B2 : **laminage immédiat des crues du Sénégal à Bakel**, avec un débit journalier QI2 limité à 4500 m³/s

- **A6 : conservation d'une revanche suffisante dans la retenue**, pour pouvoir assurer le laminage futur des crues du Sénégal à Bakel en dessous de $Q_{I2} = 4500 \text{ m}^3/\text{s}$ avec un taux de réussite T_I de 49 années sur 50, en référence à la période Ald-Alf de 1950-1998.
- **A5 : soutien des basses eaux**, concernant les usages suivants : agriculture irriguée, alimentation humaine, navigabilité. Une valeur constante (de 100, 150 ou $200 \text{ m}^3/\text{s}$) a été retenue pour le débit Q_{et} à assurer en permanence au niveau de Bakel.
- **B3 : conservation d'un stock d'eau** suffisant dans la retenue pour permettre le soutien futur de basses eaux. Le débit objectif Q_{et} envisagé est le même que dans la consigne A5, et le taux de réussite T_e retenu est de 24 années sur 25 sur la période Asd-Asf de 1950-1998
- **A2 : production d'énergie électrique**. La consigne de production d'énergie est prise en compte seulement lorsque la cote du lac se situe au dessus du seuil S1, pour lequel trois valeurs ont été testées : 187, 192 et 197 m. Elle vise à produire la puissance maximale productible P_{max} lorsque la cote du lac se situe au dessus du seuil S2, pour lequel deux valeurs ont été testées : 202 et 206 m. Enfin, quand la cote du lac se situe entre S1 et S2, la consigne vise à produire une puissance $P = \min (P_o ; P_{max})$ où P_o désigne une puissance constante pour laquelle trois valeurs ont été testées : 70, 90 et 110 mw.
- **A4 : soutien de crue**. L'hydrogramme objectif de crue Q_c retenu, dénommé "ORSTOM1", culmine à $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ et varie de façon linéaire entre les points suivants : $0 \text{ m}^3/\text{s}$ le 22 août ; $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ le 28 août ; $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ le 2 septembre ; $0 \text{ m}^3/\text{s}$ le 16 octobre. Le soutien de crue est déclenché à la date T_c du 20 août, si et seulement si la cote du lac se situe au dessus du seuil H_s , pour lequel trois valeurs ont été testées : 192, 195 et 198 m.

Les résultats obtenus sur les 162 scénarios testés montrent qu'avec ces consignes de gestion, le soutien d'étiage à 100, 150 ou $200 \text{ m}^3/\text{s}$ peut être réalisé avec très peu de défaillances. Par contre, les scénarios diffèrent beaucoup quand à la production d'énergie obtenue et à la fréquence de crues correctes réalisées, une crue étant jugée correcte si elle est supérieure, même décalée, aux 37 premiers jours de l'hydrogramme "ORSTOM1".

L'analyse des résultats porte donc essentiellement sur les paramètres P_1 (gwh/an) qui désigne la puissance électrique produite en moyenne pendant la période 1950-1998, et R (%), qui désigne le taux de faibles crues annuelles obtenues sur la même période. Pour chaque niveau de soutien d'étiage envisagé, il peut alors être déterminé un certain nombre de scénarios de gestion optimaux. Ce sont ceux qui, pour un taux de faibles crues R donné, offrent la meilleure puissance produite P_1 , ou inversement, pour P_1 donné, offrent la plus petite valeur de R .

Il s'avère que les paramètres P_1 et R relatifs aux scénarios optimaux sont liés par une fonction croissante. Cela signifie qu'une production électrique plus élevée nécessite une fréquence plus faible de crues soutenues.

SIMULATIONS EFFECTUEES AVEC L'OPTION 2

Les scénarios de gestion optimaux mentionnés ci-dessus ont fait l'objet d'une nouvelle simulation numérique dans laquelle l'option 2 a remplacé l'option 1 en ce qui concerne le soutien de crue. Ces scénarios sont au nombre de 12, 8 et 11 avec un soutien d'étiage à 100, 150 et $200 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivement.

COMPARAISON DES RESULTATS

Pour chaque niveau de soutien d'étiage, c'est la comparaison des relations $R(P_1)$ obtenues avec les options 1 et 2 qui permet de déterminer la meilleure option.

Résultats

Le tableau 1 donne pour chaque scénario simulé, les valeurs de la puissance moyenne P_1 produite entre 1950 et 1998, et du pourcentage R des crues trop faibles obtenues. Les valeurs de R sont en outre reportées en fonction de P_1 sur la figure 1. On constate les résultats suivants :

Pour chaque niveau de soutien d'étiage envisagé, l'option 2 permet d'obtenir moins de faibles crues que l'option 1 uniquement dans le cas des scénarios offrant une forte production d'énergie et un soutien de crue peu fréquent. Mais cela s'accompagne alors d'une baisse très importante de production électrique.

Pour la totalité des scénarios simulés, l'option 2 entraîne une baisse de production électrique par rapport à l'option 1.

La relation $R(P1)$ obtenue avec l'option 1 se situe systématiquement en dessous des points $R(P1)$ obtenus avec l'option 2 (fig. 1). Autrement dit, à production d'énergie égale, il existe toujours un scénario de gestion incluant l'option 1 qui donnera moins de faibles crues que les scénarios incluant l'option 2.

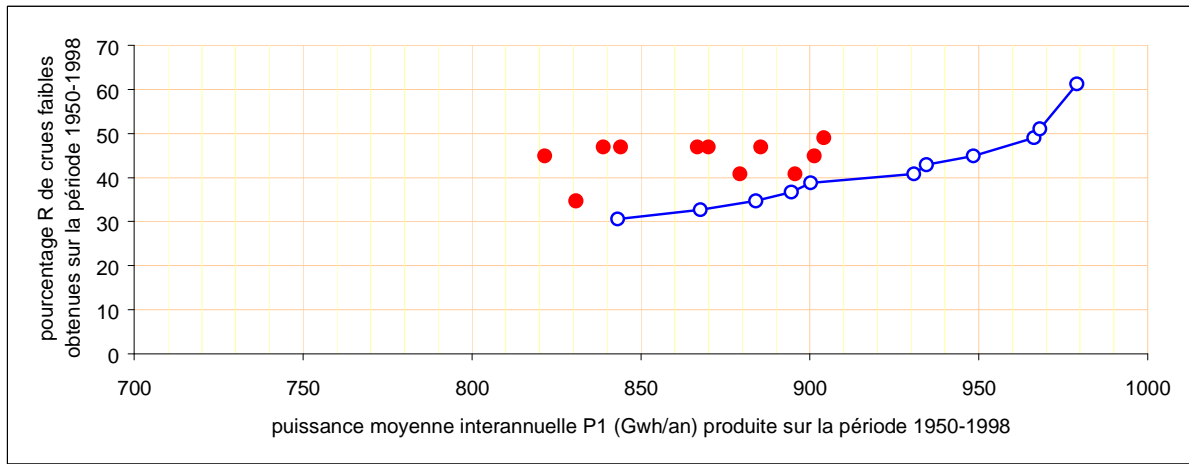
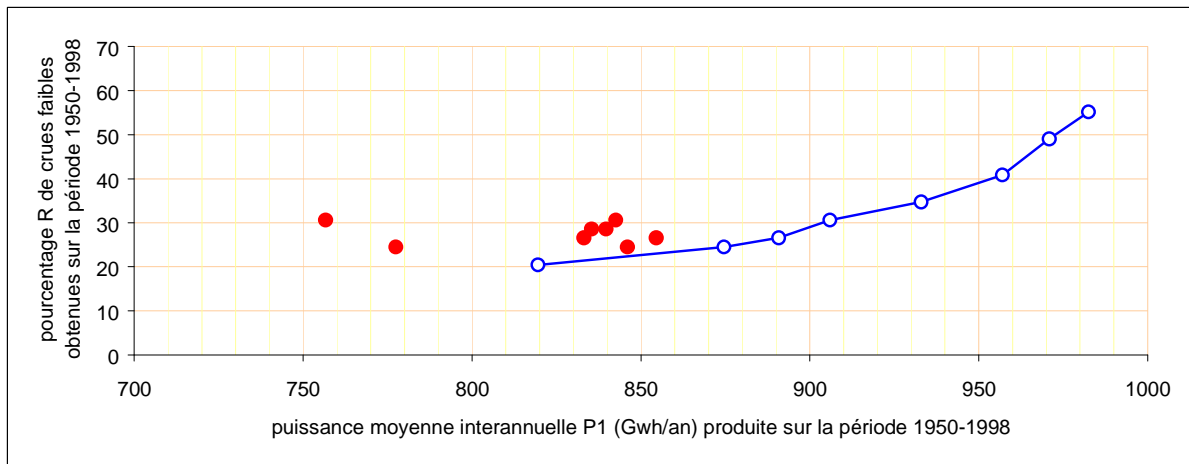
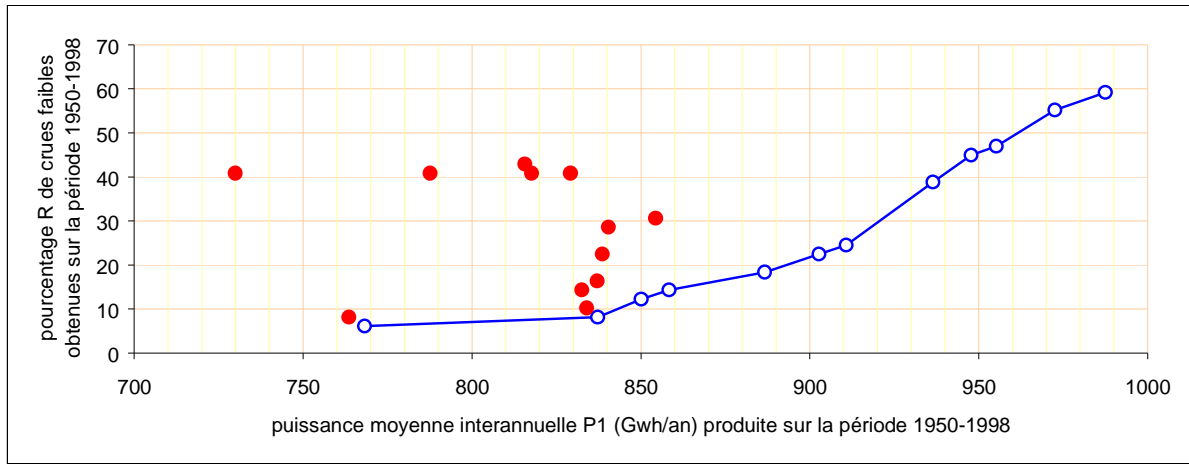
Le dernier résultat montre à lui seul qu'on a tout intérêt à retenir l'option 1 plutôt que l'option 2. Cette dernière, en laissant passer la crue naturelle, compromet la reconstitution du stock dans la retenue. Elle aboutit de ce fait à une gestion de la retenue effectuée à un niveau globalement plus bas qu'avec l'option 1. Ceci nuit autant au soutien de crue qu'à la production d'énergie, du fait qu'un stock d'eau trop faible en début de crue fait augmenter le risque de ne pouvoir réaliser le soutien jusqu'à son terme. En laissant passer la crue naturelle dont l'efficacité n'est nullement garantie, on compromet les chances de réaliser de bonnes crues durant les années ultérieures.

paramètres définissant les consignes de gestion					OPTION 1		OPTION 2	
					puissance obtenue (1950-1998)	pourcentage de crues faibles (1950-1998)	puissance obtenue (1950-1998)	pourcentage de crues faibles (1950-1998)
Qe (m ³ /s)	Hs (m)	Po (Mw)	S1 (m)	S2 (m)	P1 (gwh/an)	R (%)	P1 (gwh/an)	R (%)
100	192	70	197	206	768	6	764	8
100	192	110	197	202	837	8	834	10
100	195	90	197	202	850	12	833	14
100	195	110	197	202	858	14	837	16
100	198	70	197	202	887	18	839	22
100	198	90	197	202	903	22	840	29
100	198	110	197	202	911	24	854	31
100	195	90	192	202	936	39	829	41
100	195	110	192	202	948	45	818	41
100	198	70	192	202	955	47	816	43
100	198	90	192	202	973	55	788	41
100	198	110	192	202	987	59	730	41
150	198	70	197	206	820	20	777	24
150	195	70	197	202	875	24	846	24
150	195	90	197	202	891	27	855	27
150	198	70	197	202	906	31	833	27
150	198	90	197	202	933	35	835	29
150	198	110	197	202	957	41	840	29
150	195	110	192	202	971	49	843	31
150	198	110	192	202	982	55	757	31
200	195	70	197	206	843	31	831	35
200	198	70	192	206	868	33	822	45
200	192	110	197	206	884	35	879	41
200	198	90	197	206	895	37	844	47
200	192	110	197	202	900	39	896	41
200	198	110	197	206	931	41	867	47
200	195	110	197	202	935	43	901	45
200	198	70	197	202	948	45	870	47
200	198	110	197	202	966	49	885	47
200	195	110	192	202	968	51	904	49
200	198	110	192	202	979	61	839	47

tableau 1 : comparaison des résultats obtenus avec les options 1 et 2

Signification des termes :

- Qe (m³/s) : débit objectif d'étiage, défini pour le Sénégal à Bakel
- Hs (m) : cote minimale de la surface libre du lac au 20 août, permettant d'engager le soutien de crue annuel.
- Po (w) : puissance électrique demandée
- S1 (m) : cote limite de la surface libre du lac, en dessous de laquelle la consigne relative à la demande de production d'énergie n'est pas prise en considération.
- S2 (m) : cote limite de la surface libre du lac, au dessus de laquelle on vise à produire la puissance maximale productible en fonction de la cote
- Option 1 : en l'absence de soutien de crue, on stocke l'eau
- Option 2 : en l'absence de soutien de crue, on laisse passer la crue naturelle



- OPTION 1: en cas d'absence de soutien de crue, stockage de l'eau dans la retenue
- OPTION 2: en cas d'absence de soutien de crue, on laisse passer la crue naturelle

figure 1 :répartition du pourcentage de faibles crues obtenues en fonction de la puissance moyenne produite, pour les 31 scénarios de gestion simulés.

ANNEXE 3.5

NOTE SUR LE SOUTIEN DE CRUE A DATE FIXE SUR LE FLEUVE SENEGAL

OBJET DE CETTE NOTE ET RESUME.

On rappelle le principe du soutien de crue optimisé qui était envisagé jusqu'à présent, et qui visait à faire coïncider au mieux, dans un but d'économie d'eau, le sommet de l'hydrogramme objectif avec une pointe de débit provenant des affluents non contrôlés Bakoye et Falémé. Les modèles hydro-pluviométriques de prévision de débit testés sur le Bakoye et la Falémé, montrent pour l'heure des performances insuffisantes pour permettre d'envisager la mise en œuvre de ce type de gestion pour l'année 1998.

On montre ensuite qu'il est possible d'envisager un soutien de crue à date fixe optimale, entraînant peu de dépense d'eau supplémentaire par rapport à la dépense minimale de chaque année. Afin de ne pas handicaper la production électrique, il semble toutefois souhaitable qu'un tel soutien de crue à date fixe ne soit pas réalisé de façon systématique, afin de permettre une reconstitution du stock dans le lac certaines années. Le critère de déclenchement du soutien de crue repose alors sur la comparaison du stock d'eau disponible dans le lac au début du soutien de crue, avec le déstockage nécessaire pour réaliser ce dernier. Toujours faute de prévisions de qualité suffisante sur le Bakoye et la Falémé, ce déstockage doit pour le moment être estimé de façon statistique.

RAPPEL SUR LE PRINCIPE DU SOUTIEN DE CRUE A DATE MOBILE PROPOSE PAR L'ORSTOM

L'hydrogramme objectif retenu au niveau de Bakel est l'hydrogramme ORSTOM1 défini comme suit : 0 m³/s au jour 0 ; 2500 m³/s au jour 6 ; 2500 m³/s au jour 11 ; 0 m³/s au jour 55. Afin d'économiser le stock d'eau dans le lac de Manantali, il est envisagé de faire coïncider au mieux le soutien de crue avec une pointe de débit sur le Bakoye et la Falémé. Dans cette optique, des règles ont été proposées par l'ORSTOM pour déterminer la date de déclenchement du soutien de crue. Ce déclenchement au jour j est essentiellement conditionné par la somme des débits moyens pentadaires prévus au jour j+8 à Oualia et Goubassy, comparée à un seuil décroissant pendant l'année. Dès que ce seuil est dépassé, le soutien de crue est décidé, et déclenché au moment où la somme des débits pentadaires à Oualia et Goubassy atteint un sommet. Ces règles supposent donc que l'on dispose d'une prévision de débit sur 10 jours à Oualia et Goubassy.

Des simulations numériques montrent que, comparé à un soutien de crue mené de façon systématique à date fixe optimale, le soutien de crue à date mobile permet de faire passer le productible énergétique moyen en années sèches de 28,2 MW à 46,5 MW. Ce gain important est dû aux deux raisons suivantes :

- Le soutien de crue est déclenché à une date s'approchant au mieux de la meilleure date possible de chaque année. Nous verrons plus loin que le volume d'eau ainsi économisé n'est en fait pas très important, pour la plupart des années.
- Les règles de déclenchement retenues aboutissent, certaines années, à l'absence de soutien de crue (1983, 1984, 1987, 1990). Il se trouve que ces années sont celles pour lesquelles le soutien de crue aurait occasionné les plus fortes dépenses d'eau au niveau du barrage, et les baisses de niveau du lac ainsi évitées expliquent la plus grosse part du gain de production électrique.

Malgré les quelques années qui n'auraient bénéficié d'aucun soutien de crue dans l'hypothèse d'un soutien à date mobile, ce type de gestion aboutit à une fréquence de crue correcte supérieure à celle du régime du naturel en période sèche, un déficit important par rapport à l'hydrogramme objectif survenant une année sur cinq dans le premier cas, contre une année sur trois dans le second.

PROBLEME POSE PAR LA PREVISION DES DEBITS A OUALIA ET GOURBASSY

La connaissance des niveaux en temps réel à Fadougou sur la Falémé, et Diangola sur le Bakoye, permet d'envisager une prévision à l'horizon 2 jours et 3 jours environ sur les stations de Gourbassy et Oualia. Pour étendre cette prévision à l'horizon 10 jours, des recherches sont menées à l'ORSTOM pour caler des modèles hydro-pluviométriques de prévision sur les stations de Fadougou et Diangola. Compte-tenu de la faible densité de postes pluviométriques existant sur les bassins en question, les données disponibles et exploitables montrent malheureusement une liaison très faible avec les niveaux relevés à Fadougou et Diangola. Les recherches se poursuivent dans cette direction, mais les résultats acquis pour le moment sont trop imprécis pour pouvoir être utilisés de façon fiable. Il semble donc hasardeux, au moins pour la crue de 1998, d'envisager un soutien de crue à date mobile.

CONSIDERATIONS SUR LA DATE DU SOUTIEN DE CRUE

On adopte les notations suivantes :

$Q_{\text{Bakel}}(j)$	débit passant à Bakel le jour j
$Q_{\text{Oualia}}(j)$	débit passant à Oualia le jour j
$Q_{\text{Gourbassy}}(j)$	débit passant à Gourbassy le jour j
$Q_{\text{Manantali}}(j)$	débit lâché du barrage le jour j
$Q_{\text{intermédiaire}}(j)$	part de $Q_{\text{Bakel}}(j)$ correspondant aux apports intermédiaires entre Oualia, Gourbassy, Manantali et Bakel
j_0	date du premier jour de palier à 2500 m ³ /s de l'hydrogramme objectif à Bakel, définissant le calage de celui-ci
J_0	date de calage de l'hydrogramme objectif à Bakel occasionnant, pour une année donnée, le plus faible volume dépensé depuis le barrage
$Q_{\text{ORSTOM}}(j, j_0)$	débit objectif à Bakel au jour j , si j_0 est le premier jour de palier à 2500 m ³ /s
$D(j_0, S)$	volume lâché du barrage correspondant à la tranche de débit supérieur à S , permettant de réaliser l'hydrogramme objectif à Bakel, calé sur le jour j_0 (volume dépensé pour le soutien de crue)
$D_{\text{min}}(S)$	Volume minimal d'eau dépensé pour le soutien de crue, correspondant à la valeur minimale de $D(j_0, S)$ pour une année donnée
$G(j_0, S)$	gaspillage d'eau dû au mauvais calage de l'hydrogramme objectif
$D(j_0, S) = \sum_{j=j_0-6 \rightarrow j=j_0+49} \max \{ 0, [Q_{\text{ORSTOM}}(j, j_0) - Q_{\text{Oualia}}(j-3) - Q_{\text{Gourbassy}}(j-3) - Q_{\text{intermédiaire}}(j) - S] \}$	

Evalués sur la période 1970-1997, les apports intermédiaires représentent en moyenne environ 10% de la somme des volumes naturels écoulés à Oualia, Gourbassy et Manantali. En première approximation, il nous est donc permis de les négliger dans l'évaluation du volume d'eau dépensé $D(j_0, S)$. On gardera à l'esprit que ceci entraîne une surestimation du terme $D(j_0, S)$, décroissante avec celui-ci. Donc :

$$D(j_0, S) \simeq \sum_{j=j_0-6 \rightarrow j=j_0+49} \max \{ 0, [Q_{\text{ORSTOM}}(j, j_0) - Q_{\text{Oualia}}(j-3) - Q_{\text{Gourbassy}}(j-3) - S] \}$$

Pour chaque année, il est possible de déterminer une date optimale $j_0 = J_0$ de calage de l'hydrogramme objectif, qui correspond à une valeur minimale de $D(j_0, S)$:

$$D(J_0, S) = D_{\text{min}}(S) = \min_{j_0=1 \rightarrow j_0=365} (D(j_0, S))$$

Cette valeur $D_{\text{min}}(S)$ représente le volume minimal qu'il est nécessaire de lâcher du barrage dans la tranche des débits supérieurs à S , pour permettre de réaliser l'hydrogramme objectif pendant l'année en question.

Le fait de caler l'hydrogramme objectif sur un jour j_0 différent de la valeur J_0 de l'année, entraîne une dépense de volume $D(j_0, S)$ supérieure à la dépense minimale $D_{\text{min}}(S)$. La différence entre ces deux termes peut être interprétée comme un gaspillage d'eau ($G(j_0, S)$) dû au mauvais calage de l'hydrogramme objectif :

$$G(j_0, S) = D(j_0, S) - D_{\min}(S)$$

Les valeurs de volume dépensé D et gaspillé G ont été analysées sur l'ensemble des crues des années 1973 à 1997. Deux valeurs de seuil S ont été prises en compte pour cette analyse. Avec $S=0$, on s'intéresse à la totalité des volumes lâchés du barrage pour réaliser le soutien de crue. Avec $S=600 \text{ m}^3/\text{s}$, on s'intéresse à la part des volumes lâchés qui en aucun cas ne pourraient être turbinés. En effet, le débit maximum turbinable, envisageable dans les plus mauvaises conditions de chute, est légèrement inférieur à $600 \text{ m}^3/\text{s}$ pour les spécifications de turbines indiquées dans les rapports de 1987 du bureau d'étude Gibb & Partners.

Résultats concernant les dates optimales J_0 de calage de l'hydrogramme objectif

Les figures 1 et 2 montrent la répartition des dates optimales J_0 suivant les années, pour S valant 0 et $600 \text{ m}^3/\text{s}$. On voit que J_0 se situe entre le 20 juillet et le 3 septembre dans le premier cas, et entre le 23 juillet et le 8 septembre dans le second cas. Les années 1984 et 1990, par ailleurs très déficitaires, se démarquent nettement des autres avec une date J_0 très précoce.

Résultats concernant les volumes dépensés minimaux $D_{\min}(S)$

Les figures 3 et 4 montrent la répartition des volumes dépensés minimaux $D_{\min}(S)$ suivant les années, pour S valant 0 et $600 \text{ m}^3/\text{s}$. Les valeurs de $D_{\min}(0)$ varient entre 500 et 5800 millions de mètres cube, avec seulement deux années (1974 et 1975) en dessous de 2000. Celles de $D_{\min}(600)$ varient entre 0 et 3400 millions de mètres cube, avec seulement quatre années (1974, 1975, 1988 et 1995) en dessous de 1000.

Résultats concernant la répartition des volumes dépensés $D(j_0, S)$

Les figures 5 et 6 montrent la répartition en fonction de la date j_0 , des quantiles de la dépense d'eau $D(j_0, S)$ pour S valant 0 et $600 \text{ m}^3/\text{s}$. Leur interprétation est illustrée par l'exemple suivant, pris sur la figure 5.

Si l'on considère le calage de l'hydrogramme objectif sur le 3 août ($= j_0$), alors les valeurs minimales et maximales de $D(j_0, 0)$, observées entre 1973 et 1997 valent respectivement 2484 et 5928 millions de mètres cube. Dans neuf cas sur 10, $D(j_0, 0)$ est supérieur à 3338. Dans trois cas sur dix, $D(j_0, 0)$ est supérieur à 4937 millions de mètres cube. La médiane des valeurs observées se situe à 4414 millions de mètres cube.

Les courbes des différents quantiles montrent toutes un caractère unimodal assez marqué, avec un minimum toujours situé entre le 9 août et le 25 août pour $S=0$, et entre le 21 août et le 26 août pour $S=600 \text{ m}^3/\text{s}$. Le jour de calage j_0 donnant la plus faible valeur moyenne de $D(j_0, S)$ sur la période 1973-1997, se situe le 22 août avec une moyenne de 4005 millions de mètres cube pour $S=0$, et le 28 août avec une valeur moyenne de 2028 millions de mètres cube pour $S=600 \text{ m}^3/\text{s}$.

Résultats concernant la répartition des volumes gaspillés $G(j_0, S)$

Les figures 7 et 8 montrent la répartition en fonction de la date j_0 , des quantiles du gaspillage d'eau $G(j_0, S)$ pour S valant 0 et $600 \text{ m}^3/\text{s}$. Ces figures dont l'allure générale rappelle celle des figures 5 et 6, s'interprètent de la même façon que ces dernières. On remarque que le minimum des différents quantiles de $G(j_0, S)$ se situe toujours entre le 21 août et le 26 août pour $S=0$, et entre le 20 août et le 1^{er} septembre pour $S=600 \text{ m}^3/\text{s}$. Le jour j_0 qui donne la plus faible valeur moyenne de $G(j_0, S)$ sur la période 1973-1997, se situe le 22 août avec une valeur de 135 millions de mètres cube pour $S=0$, et le 28 août avec une valeur moyenne de 157 millions de mètres cube pour $S=600 \text{ m}^3/\text{s}$.

Conclusion sur la date de soutien de crue

On constate qu'il est possible d'effectuer un soutien de crue à date fixe, occasionnant assez peu de dépense d'eau supplémentaire par rapport à un soutien effectué à date variable, calée chaque année de façon optimale par rapport à la situation hydrologique.

Si l'on souhaite limiter au maximum les lâchers d'eau effectués pour le soutien de crue, il convient de fixer au 22 août la date du premier jour de palier à 2500 m³/s à Bakel. Cette solution entraîne un gaspillage d'eau limité entre 0 et 449 millions de mètres cube selon les années, avec une moyenne de 135, par rapport au calage mobile optimal. Selon les années, le volume d'eau dépensé pour un tel soutien de crue varie entre 671 et 5795 millions de mètres cube, avec une moyenne de 4005.

Si l'on souhaite limiter au maximum les lâchers d'eau non turbinée effectués pour le soutien de crue, il convient de fixer au 28 août la date du premier jour de palier à 2500 m³/s à Bakel. Cette solution entraîne un gaspillage d'eau non turbinée limité entre 0 et 496 millions de mètres cube selon les années, avec une moyenne de 157, par rapport au calage mobile optimal. Selon les années, le volume d'eau non turbinée dépensé pour un tel soutien de crue varie entre 9 et 3401 millions de mètres cube, avec une moyenne de 2028.

Il semble donc que l'économie d'eau que l'on peut espérer faire en calant le soutien de crue de façon variable optimale, soit assez faible en regard des risques inhérents à une telle procédure. En effet, des prévisions de qualité insuffisante sur le Bakoye et la Falémé peuvent entraîner un calage à contretemps, qui risque de se traduire par un gaspillage d'eau dépassant l'économie que l'on espérait réaliser.

Pour l'heure, nous ne pouvons donc que préconiser un soutien de crue à date fixe, calé comme indiqué plus haut

CRITERES PROPOSES POUR LA PRISE DE DECISION DU SOUTIEN DE CRUE

Considérations sur l'opportunité de soutenir la crue chaque année

On se rappelle que des simulations numériques avaient montré des possibilités de production électrique beaucoup plus faible dans le cas d'un soutien de crue à date fixe, que dans le cas d'un soutien à date mobile optimale. Les résultats qui précèdent montrent que cette différence de production s'explique essentiellement par le fait que le soutien à date mobile aboutit certaines années à l'absence totale de soutien, permettant le maintien ou la reconstitution du stock dans le lac. Au contraire, le soutien de crue systématique à date fixe peut entraîner, lors d'une longue période déficitaire comme celle que nous connaissons depuis le début des années 70, un abaissement très important du niveau moyen annuel du lac, dont on ne parvient pas à reconstituer le stock. Il apparaît donc nécessaire, pour ne pas grever complètement la production électrique, de ne pas effectuer le soutien de crue à date fixe de façon systématique.

Du point de vue des quantités d'eau disponibles, les simulations numériques montrent le résultat paradoxal suivant : si l'on considère l'agriculture irriguée comme prioritaire, alors même l'agriculture de décrue n'a peut-être pas intérêt à voir le soutien de crue déclenché systématiquement chaque année en période de faible hydraulité. En effet, ce soutien systématique peut aboutir à un abaissement considérable du niveau moyen du lac. Certaines années, la préservation prioritaire de la réserve nécessaire pour l'irrigation lors du prochain étiage, empêche alors le soutien de crue, bien qu'engagé, d'être mené à terme. De l'eau a donc été lâchée dans ce cas pour n'effectuer qu'un soutien de crue partiel, dont l'utilité agricole peut être mise en doute. Cette eau conservée dans le lac aurait pu au contraire être utilisée pour faire un soutien de crue efficace l'année suivante.

Partant de ces constatations, quelles crues faut-il soutenir ou non ? Les agriculteurs pratiquant la culture de décrue auront intérêt à ce que les crues soient soutenues le plus souvent possible. Le producteur d'électricité aura tout au contraire intérêt à ce qu'elles le soient moins souvent. De multiples facteurs doivent bien sûr intervenir dans cette prise de décision, dont beaucoup ne sont pas du ressort de l'hydrologie. Nous ne nous intéresserons ici qu'à des critères concernant les quantités d'eau disponibles et les quantités d'eau à dépenser pour faire le soutien de crue.

Principe des critères de décision concernant les volumes disponibles et nécessaires pour effectuer le soutien de crue

Comme point de départ, il semble nécessaire d'envisager une fréquence de crue correcte (c'est à dire ne présentant pas de déficit important par rapport à notre hydrogramme objectif) au moins égale à celle du régime naturel, qui est de deux années sur trois en période sèche. Il faut maintenant proposer des critères permettant de décider chaque année en temps réel, au moment du déclenchement du soutien de crue, si celui-ci sera effectué ou non.

A première vue, la meilleure solution possible au regard de la dépense en eau, consiste à renoncer de façon prioritaire au soutien de crue pour les années présentant les plus fortes valeurs de volume à dépenser $D(j_0, S)$, pour j_0 calé sur le 22 août si l'on considère le critère $S=0$, ou j_0 calé sur le 28 août si l'on considère le critère $S= 600 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette solution présente cependant les deux inconvénients suivants :

- Au moment du déclenchement du soutien de crue, qui se situe environ 8 jours avant la date j_0 , seule une prévision assez précise et à suffisamment long terme sur le Bakoye et la Falémé permettrait d'avoir une estimation du volume à dépenser pour le soutien de crue de l'année en cours. Comme nous l'avons vu plus haut, nos recherches se poursuivent sur les modèles de prévision hydro-pluviométriques nécessaires, mais les résultats obtenus pour le moment sont insuffisants, et ne nous permettent pas encore d'envisager cette solution.
- Il ne semble pas judicieux de s'intéresser au volume d'eau à dépenser pour le soutien de crue, sans le comparer au volume d'eau disponible dans la retenue. Il pourrait en effet arriver certaines années où, le niveau de départ étant très bas dans le lac, il serait préférable de ne pas faire le soutien de crue même si celui-ci ne demande qu'une dépense moyenne de volume. Inversement, un soutien de crue nécessitant une grosse dépense de volume pourrait fort bien être envisagé les années où le niveau de départ est très haut dans le lac.

Les raisons qui précèdent nous amènent à proposer comme critère de décision du soutien de crue, pour le jour j_0-8 , une estimation statistique du niveau probablement atteint dans le lac un an après, soit le jour $j_0-8+365$. La décision de faire le soutien de crue ou non peut alors être prise en fonction d'un certain seuil de risque accepté pour un niveau plancher. Le principe de calcul du critère proposé est expliqué ci-dessous. On donne ensuite un exemple illustrant son utilisation.

On considère un hydrogramme objectif annuel défini au niveau de Bakel. Pendant la période de crue, il s'agit de l'hydrogramme objectif de crue (ORSTOM1) calé sur le jour j_0 (= 22 août ou 28 août selon le critère retenu pour les volumes dépensés). Le reste du temps, il s'agit des débits à assurer pour les besoins des cultures irriguées, de la navigation, de la consommation humaine, de la compensation des pertes etc.

A l'aide du logiciel SIMULSEN, on effectue une simulation numérique du fonctionnement de Manantali, dans laquelle l'unique consigne prise en compte pour les lâchers consiste à réaliser en permanence l'hydrogramme objectif annuel défini plus haut. Cette simulation ne suppose donc aucune contrainte sur les lâchers, qui serait due aux caractéristiques de l'ouvrage ou aux quantités d'eau disponibles. On obtient donc à l'issue du calcul, sur toute la période simulée, une chronique journalière Q_s des lâchers qui aurait permis de réaliser en permanence l'hydrogramme objectif annuel. On dispose par ailleurs d'une chronique journalière Q_e des débits entrant dans la retenue, estimée au droit du barrage (valeurs observées à la station de Soukoutali jusqu'en 1983, puis reconstituées à partir de Makana ensuite). En adoptant ensuite une valeur moyenne annuelle Q_p pour les pertes par évaporation sur la retenue, il est alors possible d'élaborer un échantillon de volumes annuels (entre les jours j_0 , et j_0-1 de l'année suivante) stockés nets V_s sur la retenue, de la façon suivante :

$$V_s = \sum_{j=j_0 \rightarrow j_0+365} (Q_e - Q_s - Q_p)$$

L'analyse statistique des valeurs V_s obtenues permet ensuite de déterminer, à partir du volume $V(j_0)$ disponible dans le lac au jour j_0 , une statistique des volumes stockés probables un an après j_0 si l'hydrogramme objectif annuel est réalisé.

Exemple de calcul et d'utilisation du critère de décision concernant le déclenchement du soutien de crue

On considère un soutien de crue calé de façon que le premier jour j_0 de débit à 2500 m³/s tombe le 28 août à Bakel. On considère également que l'objectif défini pour le restant de l'année est de maintenir à cette station un débit supérieur ou égal à 100 m³/s dans un premier cas et à 200 m³/s dans un second cas. On considère enfin que la cote dans le lac au 20 août, jour de prise de décision du soutien de crue, vaut 198m.

Les simulations numériques nous donnent alors les volumes stockés nets dans la retenue entre le 20 août et le 19 août de l'année suivante, résultant de la réalisation systématique de l'objectif dans les deux cas définis ci-dessus. Les pertes nettes par évaporation sur la retenue sont estimées à une valeur moyenne de 5,7 mm/jour (valeur tirée des études menées par Cogels et Gac sur le lac de Guiers). Pour une superficie moyenne du lac estimée à 400 km², ceci donne une perte moyenne par évaporation de 832 millions de mètres cube par an. Les valeurs du bilan de volume sur la retenue sont données dans le tableau 1.

période		volumes d'eau sur la retenue (millions de mètres cube)					
début	fin	E : entrée	P : pertes	S : sortie (étiage soutenu à 100 m ³ /s)	S : sortie (étiage soutenu à 200 m ³ /s)	Vs=E-P-S : stockage net (étiage soutenu à 100 m ³ /s)	Vs=E-P-S : stockage net (étiage soutenu à 200 m ³ /s)
20/08/73	19/08/74	7941	832	5380	7735	1728	-627
20/08/74	19/08/75	9585	832	2120	4350	6632	4402
20/08/75	19/08/76	9195	832	3320	5536	5043	2827
20/08/76	19/08/77	8225	832	5350	7445	2043	-52
20/08/77	19/08/78	5937	832	5161	7457	-56	-2352
20/08/78	19/08/79	7364	832	4943	7197	1588	-665
20/08/79	19/08/80	5949	832	6167	8565	-1051	-3449
20/08/80	19/08/81	7205	832	5352	7819	1021	-1446
20/08/81	19/08/82	5764	832	5821	8343	-890	-3412
20/08/82	19/08/83	6658	832	5681	8242	145	-2416
20/08/83	19/08/84	6276	832	7094	9524	-1651	-4081
20/08/84	19/08/85	4579	832	6990	9443	-3244	-5696
20/08/85	19/08/86	6074	832	6067	8655	-825	-3413
20/08/86	19/08/87	6784	832	6060	8674	-108	-2722
20/08/87	19/08/88	7476	832	6635	8996	9	-2351
20/08/88	19/08/89	6845	832	3605	6099	2408	-86
20/08/89	19/08/90	7574	832	4716	7024	2026	-283
20/08/90	19/08/91	6450	832	6644	9059	-1027	-3442
20/08/91	19/08/92	8272	832	5539	7941	1900	-501
20/08/92	19/08/93	6285	832	6170	8668	-718	-3216
20/08/93	19/08/94	5897	832	5918	8344	-853	-3279
20/08/94	19/08/95	9503	832	3720	5858	4951	2813
20/08/95	19/08/96	8770	832	3773	6078	4165	1861
20/08/96	19/08/97	8344	832	4742	7132	2771	380

Tableau 1 : bilan d'eau sur la retenue de Manantali, résultant de la réalisation systématique de l'hydrogramme ORSTOM1 calé sur le 28 août à Bakel, suivi le restant de l'année d'un débit maintenu supérieur ou égal à 100 m³/s dans un premier cas, et à 200 m³/s dans un second cas.

La moyenne du stockage net dans le lac s'élève à +1084 millions de mètres cube par an dans le cas du soutien d'étiage à 100 m³/s, contre -1300 dans le cas du soutien d'étiage à 200 m³/s. On voit donc clairement que le soutien de crue systématique peut aboutir globalement soit à un relèvement, soit à un abaissement du niveau du lac sur le long terme, selon qu'il est suivi d'un soutien d'étiage à 100 m³/s ou 200 m³/s.

La figure 9 montre la fonction de répartition des volumes stockés nets annuels. Si l'on considère le cas du soutien d'étiage à 100 m³/s, cette fonction donne des valeurs de +1963 et -413 millions de mètres cubes pour les probabilités 0,333 et 0,667 respectivement. La cote 198 m observée le 20 août représentant un volume stocké de 7060 millions de mètres cube, on en déduit donc que le soutien de crue entraînera une évolution du niveau dans le lac aboutissant, le 19 août de l'année suivante à un stock : supérieur à 6647 10⁶ m³ (cote 196,71) avec deux chances sur trois :

- inférieur à $9023 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (cote 202,96) également avec deux chances sur trois

Si le soutien de crue est suivi d'un soutien d'étiage à $200 \text{ m}^3/\text{s}$, alors la répartition des stockages annuels nets donne des valeurs de -392 et -2970 millions de mètres cube pour les probabilités 0,333 et 0,667 respectivement. Le soutien de crue déclenché à partir de la cote 198 aboutira donc dans ce cas, au 19 août de l'année suivante, à un stock :

- Supérieur à $4090 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (cote 188,72) avec deux chances sur trois.
- Inférieur à $6668 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (cote 196,77) également avec deux chances sur trois.

On voit donc que la décision d'effectuer ou non le soutien de crue peut alors être prise en fonction d'un objectif de cote à atteindre au 19 août de l'année suivante, pour lequel on accepte un certain risque d'échec. Si cet objectif consiste à obtenir une cote supérieure à 190 avec deux chances sur trois, alors dans le cas de notre exemple, le soutien de crue peut être déclenché s'il est suivi d'un soutien d'étiage à $100 \text{ m}^3/\text{s}$, alors qu'il ne doit pas l'être dans le cas du soutien d'étiage à $200 \text{ m}^3/\text{s}$.

Sur le long terme, l'ensemble de ce processus revient à conditionner le déclenchement du soutien de crue à la disponibilité d'un certain stock dans le lac au moment de la prise de décision. L'ORSTOM envisage d'effectuer des simulations numériques au pas de temps journalier sur de longues périodes, avec différentes valeurs retenues pour ce seuil de stock, afin de tester leur effet sur la production électrique et la fréquence des crues correctes obtenues à long terme. Pour le cas des années où le soutien de crue n'est pas déclenché, plusieurs options seront envisagées, allant du simple maintien de débit sanitaire réservé, jusqu'au maintien d'un niveau constant dans le lac pendant la durée théorique du soutien de crue.

CONCLUSION

Les performances des modèles de prévision de débit développés pour le Bakoye et la Falémé sont actuellement insuffisantes pour permettre la mise en place d'un soutien de crue à date mobile optimale sur le Sénégal. Un soutien de crue à date fixe doit donc être envisagé. Pour un hydrogramme objectif de type ORSTOM1, le calage optimal du point de vue de l'économie d'eau dans la retenue consiste à placer le premier jour de palier à $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ à Bakel, le 22 août si l'on veut lâcher le moins d'eau possible du barrage, ou le 28 août si l'on veut lâcher le moins possible d'eau non turbinée.

On peut espérer obtenir avec un soutien de crue à date fixe, des performances assez proches de celles qui étaient envisagées avec le soutien à date mobile, tant du point de vue de la production électrique que de la qualité des crues. Il est nécessaire pour cela d'accepter que certaines années, afin d'éviter l'épuisement progressif du stock dans le lac, le soutien de crue ne soit pas réalisé. Le nombre d'années sans soutien de crue doit nécessairement croître avec les débits envisagés pour le soutien d'étiage.

Pour une année prise isolément, il est possible d'établir à l'aide du logiciel SIMULSEN, une prévision statistique à l'horizon d'une année sur le niveau qui sera atteint dans le lac à l'issue du soutien de crue et du soutien d'étiage. Cette prévision peut être utilisée comme critère de décision sur l'opportunité de réaliser ou non le soutien de crue pour l'année en question.

Pour la gestion du barrage sur le long terme avec soutien de crue à date fixe, on peut envisager un critère simple permettant de décider chaque année au moment du début du soutien, si celui-ci sera réalisé ou non. Ce critère consiste à comparer le stock d'eau disponible dans le lac, avec une valeur seuil de stock minimal requis. Des simulations numériques vont être effectuées pour évaluer l'effet à long terme de différentes valeurs d'un tel seuil, combinées à différentes options de gestion retenues pour les années sans soutien de crue.

La possibilité d'anticiper la décision du soutien de crue, par rapport au début de celui-ci, sera également examinée. Une telle anticipation, à condition qu'elle n'engendre pas de dépenses d'eau supplémentaires trop importantes, serait d'un grand intérêt, puisqu'on pourrait alors savoir chaque année, un peu à l'avance, si la crue sera soutenue ou non.

figure 1 : quantième du premier jour à 2 500 m³/s, pour une dépense d'eau minimale au dessus de 0 m³/s

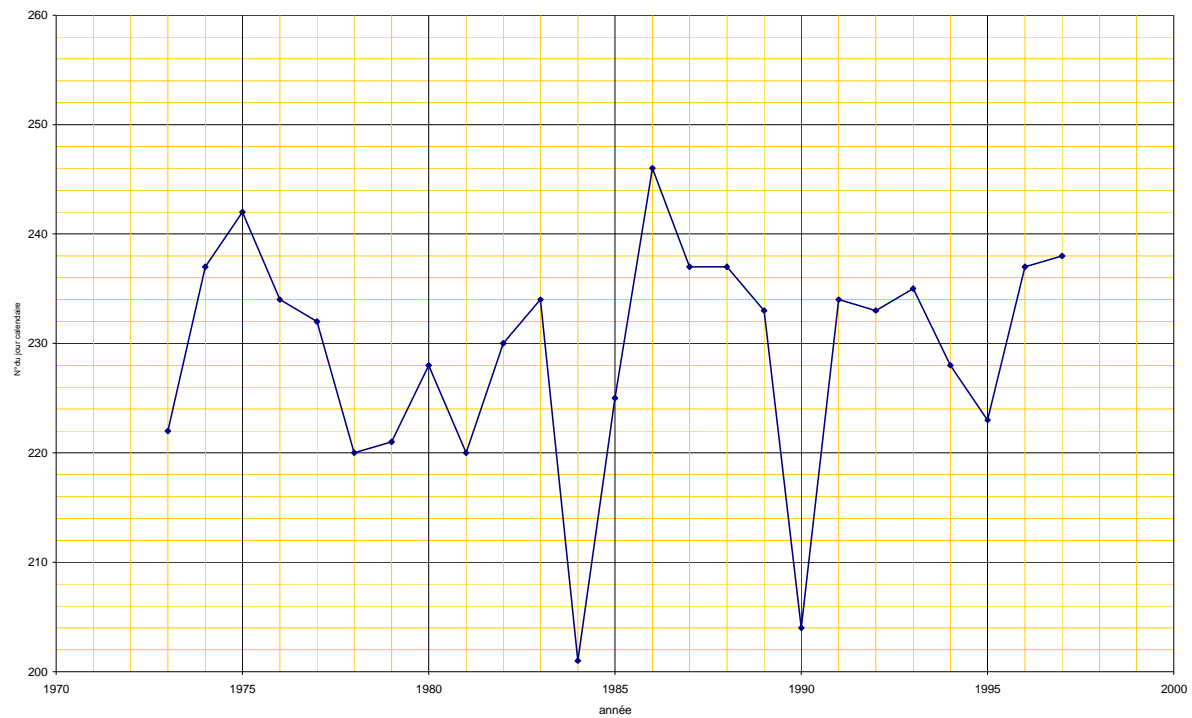
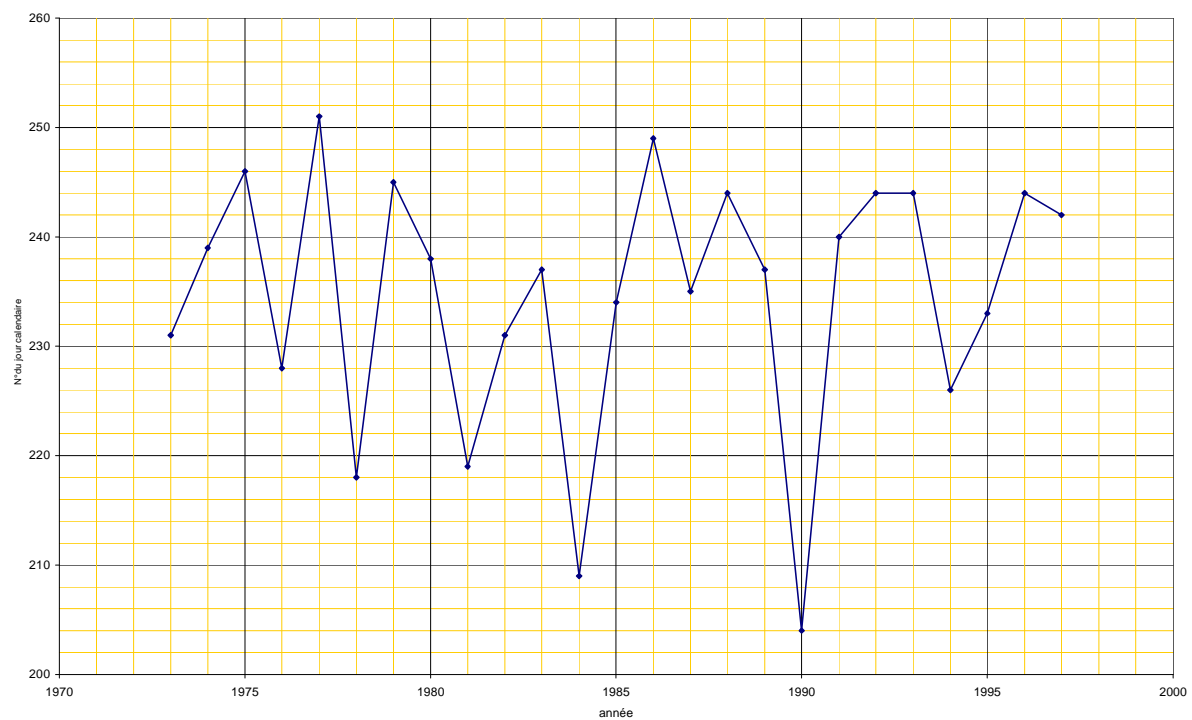


figure 2 : quantième du premier jour à 2 500 m³/s, pour une dépense d'eau minimale au dessus de 600 m³/s



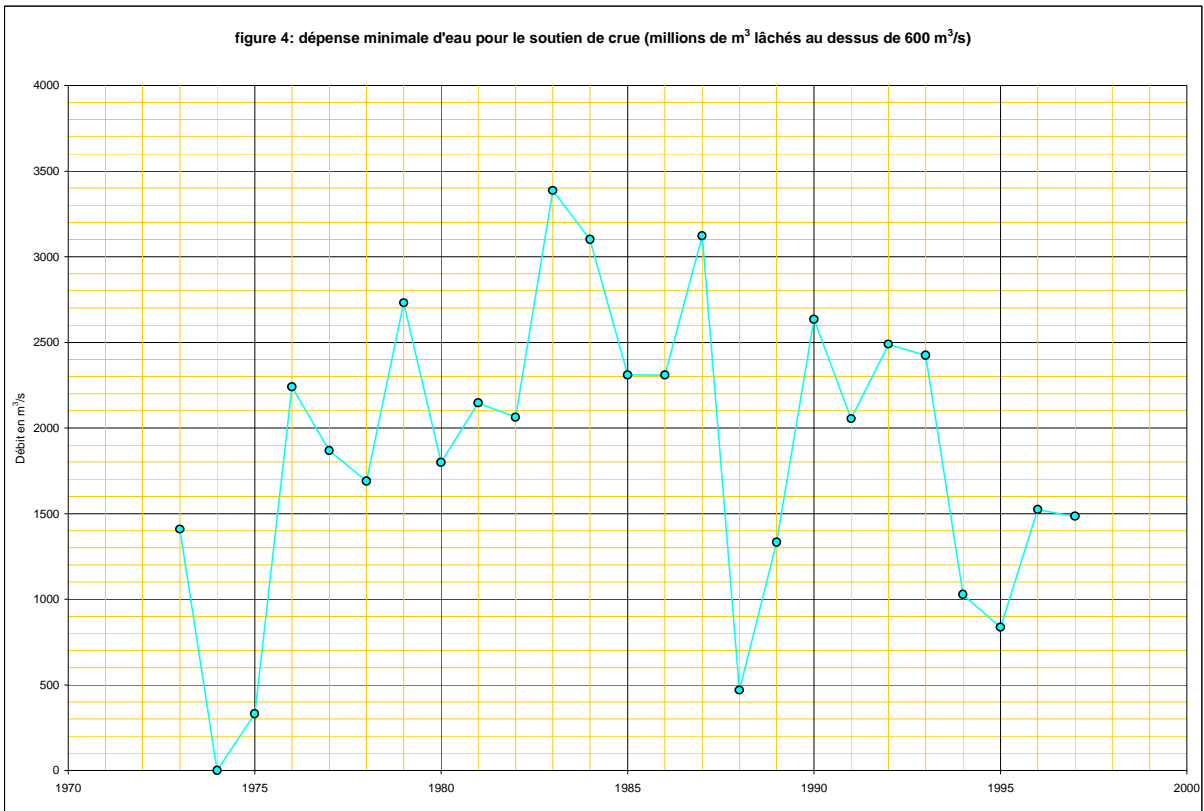
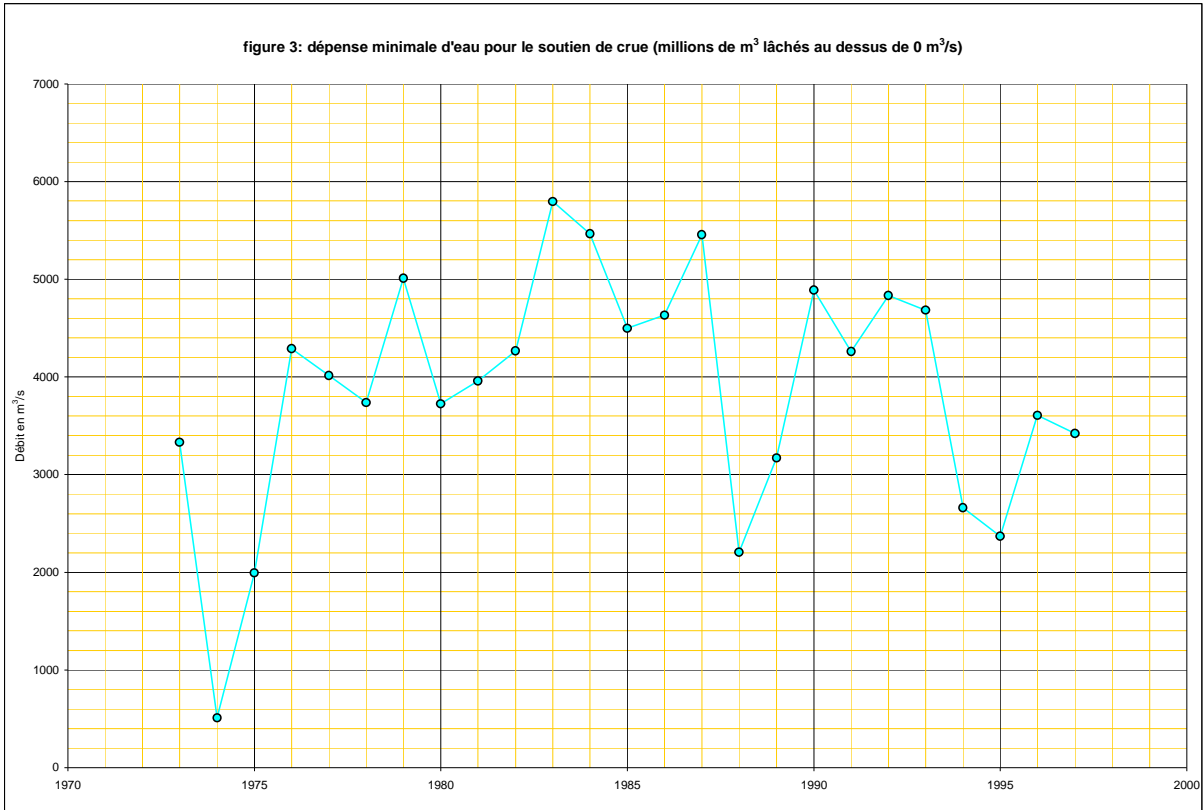


figure 5 : Répartition de la dépense d'eau (millions de m³ lâchés au dessus de 0 m³/s), en fonction de la date du premier jour à 2 500 m³/s
Crues de la période 1973 - 1997

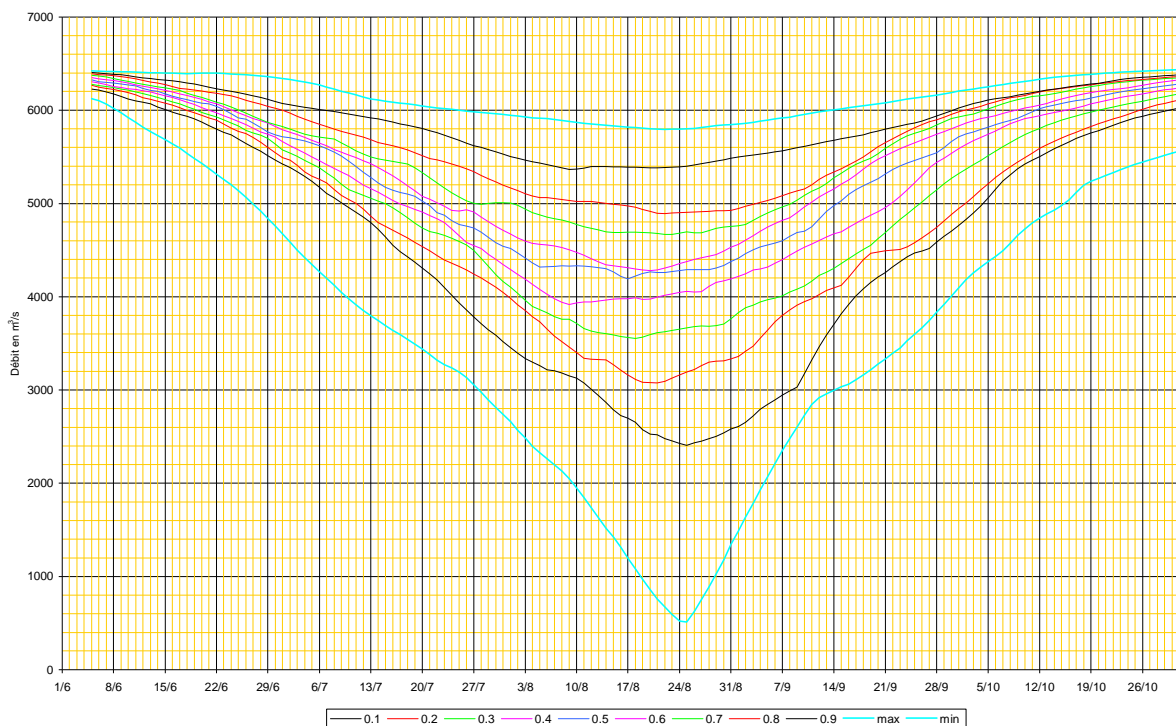


figure 6 : Répartition de la dépense d'eau (millions de m³ lâchés au dessus de 600 m³/s), en fonction de la date du premier jour à 2 500 m³/s
Crues de la période 1973 - 1997

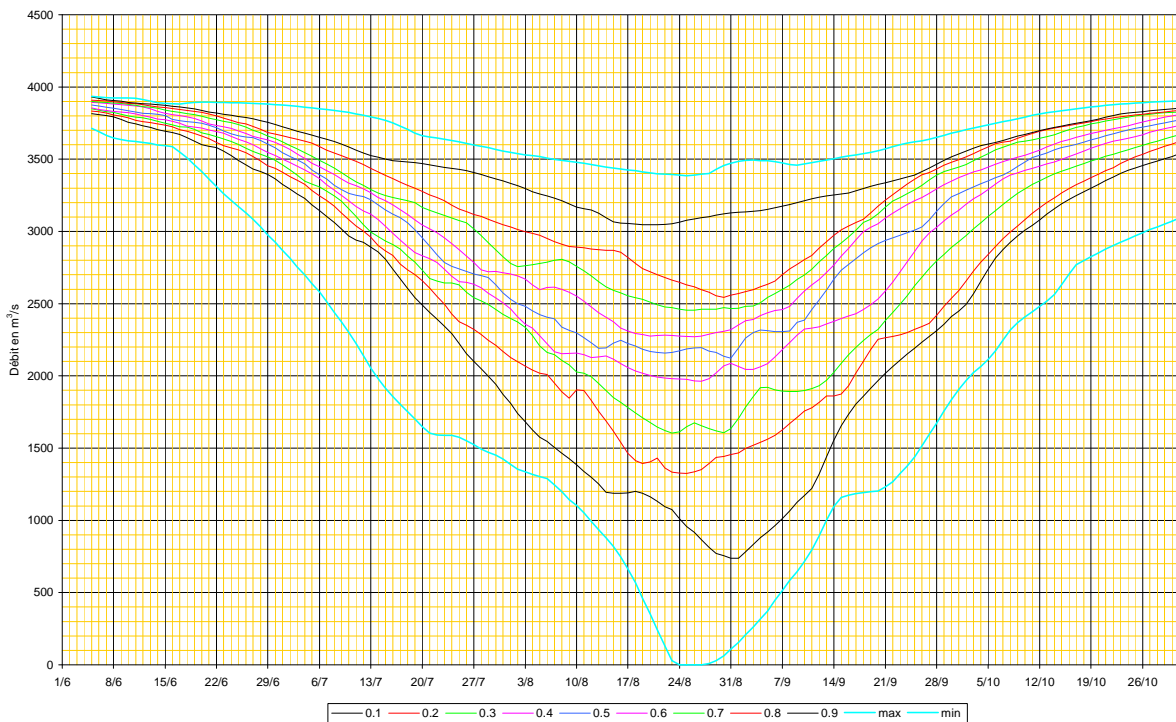


figure 7 : Répartition du gaspillage effectué pour le soutien de crue en plus de la dépense minimale d'eau (millions de m³ lâchés au dessus de 0 m³/s), en fonction de la date du premier jour à 2 500 m³/s Crues de la période 1973 - 1997



figure 8 : Répartition du gaspillage effectué pour le soutien de crue en plus de la dépense minimale d'eau (millions de m³ lâchés au dessus de 600 m³/s), en fonction de la date du premier jour à 2 500 m³/s Crues de la période 1973 - 1997

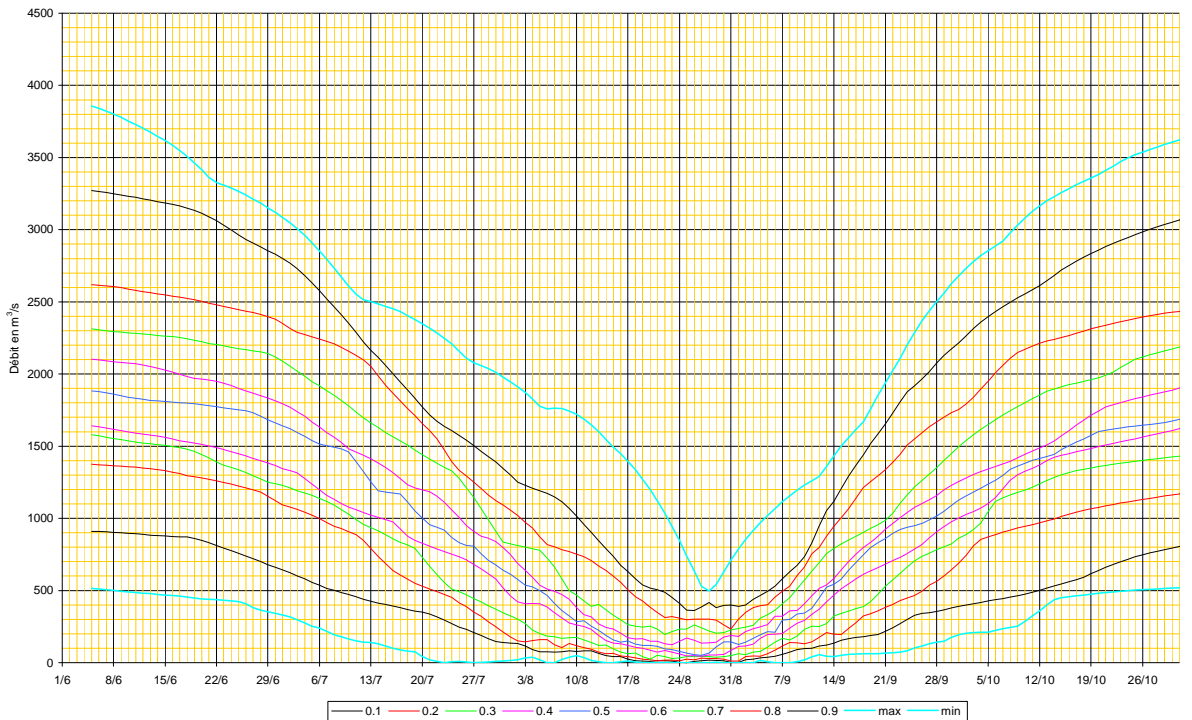
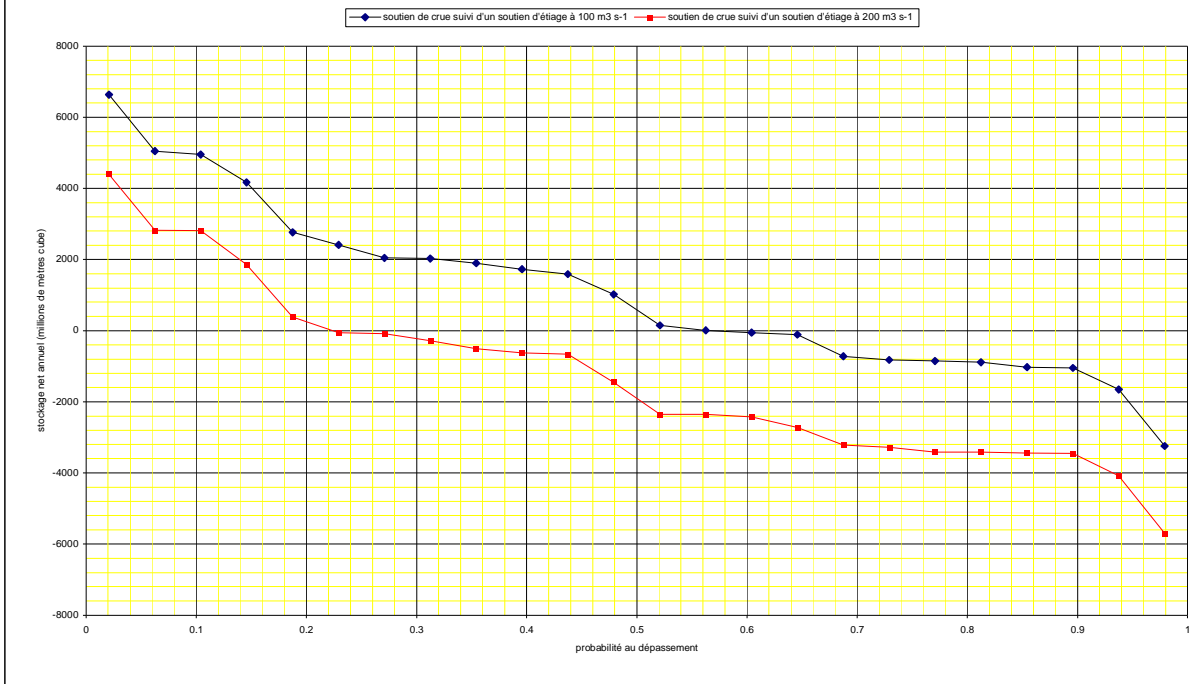


figure 9: fonction de répartition du stockage net annuel dans la retenue



ANNEXE 3.6

Glossaire de quelques termes employés dans le manuel provisoire de gestion de Manantali

Autorégression : l'autorégression consiste à établir à partir de la chronique d'une variable donnée, une relation générale entre cette variable au temps T et cette même variable aux temps antérieurs à T. La relation obtenue permet de faire une prévision de la variable à partir de ses dernières valeurs observées :

$$A(t+DT) = f(A(t), A(t-1), \dots, A(t-n))$$

Plus les fluctuations de la variable sont lentes et progressives, plus l'horizon de temps de la prévision peut être grand. Dans le cas des stations hydrométriques du haut bassin du Sénégal situées à l'amont de Bakel, en période de crue, ce type de prévision peut être efficace à l'horizon de quelques heures. A l'horizon 2 jours, elle atteint vraiment ses limites, en améliorant assez peu la prévision élémentaire consistant à dire : $A(t+2\text{jours}) = A(t)$

Contrainte de gestion : ces contraintes, liées aux dimensions géométriques des différentes parties du barrage, imposent une limite maximale et une limite minimale au débit qu'il est physiquement possible de lâcher. Celles-ci correspondent respectivement à l'ouverture maximale ou minimale de tous les organes d'évacuation de l'ouvrage, dans le cadre des règles édictées par le constructeur. Dans tous les cas, le débit lâché se situe forcément à l'intérieur de ces limites, quelle que soit la décision prise au niveau de la gestion.

Consigne de gestion : c'est une règle permettant de calculer le débit minimal ou maximal qu'il est nécessaire de lâcher du barrage, dans le but de satisfaire un objectif de gestion donné. Il peut s'agir de la satisfaction directe de cet objectif (par exemple : lâcher un débit supérieur ou égal au débit sanitaire réservé), ou de sa satisfaction indirecte (par exemple : lâcher un débit inférieur ou égal à une valeur donnée, de façon à conserver un stock suffisant pour le soutien d'étiage futur).

Lorsque deux consignes induisent une limite de même nature (minimale ou maximale) pour le débit à lâcher, peut importe l'ordre dans lequel elles sont prises en compte successivement. Par contre, lorsque l'une induit une limite minimale, et l'autre une limite maximale pour le débit à lâcher, il peut se produire que les deux soient incompatibles. L'ordre de priorité dans lequel les deux consignes seront prises en compte a dans ce cas une grande importance, puisque seule l'une des deux pourra alors être respectée.

Consigne de sécurité : c'est une règle permettant de calculer un débit minimal ou maximal qu'il est nécessaire de lâcher du barrage, pour éviter tout risque de détérioration de l'ouvrage. Pour le moment, deux consignes de ce type sont clairement identifiées, correspondant chacune au respect d'un niveau minimal ou maximal à respecter dans la retenue. Le niveau minimal concerne la protection de la partie basse du parement amont de l'ouvrage, qu'il est préférable de garder toujours submergée pour éviter les risques de sape par la houle. Le niveau maximal concerne la protection des digues du barrages, qui ne doivent en aucun cas être submergées.

Correction en boucle fermée : Il s'agit d'une procédure utilisée dans le calcul du débit à lâcher de Manantali qui donnera, une fois propagé, un certain débit objectif minimal ou maximal à respecter dans le Sénégal à Bakel. Ce calcul repose sur l'utilisation de modèles de propagation qui donnent le débit à Bakel à partir des débits à Manantali, Oualia et Gourbassy, en faisant une estimation des temps de parcours et des apports non contrôlés entre ces stations. La correction en boucle fermée utilise les écarts les plus récents constatés entre les débits observés à Bakel et ceux qui étaient prévus par les modèles de propagation, pour réajuster la valeur de débit à lâcher calculée par ces modèles.

Débit lâché : il s'agit du débit que laisse passer le barrage par ses organes d'évacuation.

Débit sanitaire réservé : pour les barrages contrôlant la totalité de l'écoulement de rivières importantes, il est couramment imposé de lâcher en permanence un débit supérieur à un débit sanitaire réservé, qui peut être déterminé par législation locale. Ce débit minimal est destiné à satisfaire les besoins de populations riveraines installées à l'aval de l'ouvrage, ainsi qu'à maintenir un certain équilibre écologique dans le cours d'eau.

Energie : qu'elle soit électrique, mécanique ou de toute autre nature, l'énergie représente une quantité de travail, elle-même homogène au déplacement d'une force. Homogène au produit force*longueur, l'énergie correspond à une puissance développée pendant un certain temps. Les performances d'une installation de production électrique sont couramment représentées par la quantité d'énergie produite par année, qui revient à une puissance moyenne produite. Une énergie peut être exprimée suivant différentes unités, parmi lesquelles on peut citer : le joule ; la calorie ; l'électronvolt ; la thermie ; le kilowattheure ; le gigawattheure.

On a les relations suivantes entre certaines de ces unités :

1 joule = 1 newton.mètre

1 kilowattheure = 1000*3600 watt.seconde = 3600000 joules

1 gigawattheure = 1000000 kilowattheure

Etalonnage de station hydrométrique : on appelle ainsi la relation qui existe entre la cote du plan d'eau relevée à la station, et le débit qui traverse la section du fleuve à cet endroit. Cette relation est généralement bi-univoque, ce qui signifie qu'à une cote correspond une unique valeur de débit. Pour les cours d'eau à très faible pente cependant, elle est plus complexe, et fait correspondre à une cote donnée un débit plus fort en période de montée de crue qu'en phase de descente.

Laminage de crue : c'est l'aplatissement relatif de l'hydrogramme de crue (cote ou débit en fonction du temps), qui s'opère par effet de stockage-déstockage entre une station donnée et une autre station située à l'aval. Ce stockage peut s'opérer de façon naturelle par débordements dans le lit majeur (cas du bief Bakel-Dagana), ou de façon artificielle à l'aide d'un barrage. Le laminage peut dans ce dernier cas être considéré comme un objectif de gestion de l'ouvrage. On vise alors pour protéger les populations et les aménagements, à ce que le débit ne dépasse pas une valeur donnée à l'aval du barrage, soit juste à sa sortie, soit en un point plus éloigné.

Objectifs de gestion : ce sont les buts concrets visés par la gestion du barrage. Dans le cas de Manantali, il s'agit de la production d'électricité, du soutien d'étiage (irrigation, consommations diverses, navigabilité), du soutien de crue (cultures traditionnelles, équilibre écologique), du laminage des crues (protection des populations et des aménagements). Les débits à lâcher pour satisfaire les objectifs de gestion sont calculés à l'aide des consignes correspondantes.

Organes d'évacuation du barrage : l'eau peut être lâchée du barrage par ses vannes de demi-fond, ses vannes de surface (évacuateur de crue), et par les turbines de l'usine électrique.

Puissance : la puissance représente une quantité d'énergie développée par unité de temps. Les dimensions des turbines ainsi que leur nombre, permettent de caractériser une usine hydroélectrique par la puissance instantanée maximale qu'elle est capable de produire. La puissance, homogène au quotient énergie/temps, peut être exprimée en différentes unités, parmi lesquelles : le watt, le cheval, le gigawattheure/an. On a les relations suivantes entre ces unités :

1 watt = 1 joule/seconde

1 mégawatt = 1000000 watt

1 gigawattheure/an = $1000000000 \text{ watt.heure} / (24 \cdot 365,25 \text{ heures}) = 114077,12 \text{ watt}$

Revanche : il s'agit du volume resté libre d'eau dans la tranche supérieure de la retenue. Plus cette revanche est importante, plus le laminage effectué à l'aide du barrage peut être efficace.

Tarissement : un cours d'eau est en régime de tarissement lorsque son débit ne provient plus que de la vidange de son lit (mineur et majeur) et de la vidange des nappes d'eau souterraines.

ANNEXE 4

Réponses de l'IRD aux remarques concernant le manuel provisoire de gestion du barrage de Manantali, et le rapport intérimaire de 2eme phase du POGR

Auteur : JC Bader

Il s'agit dans cette note de répondre aux remarques écrites qui ont été transmises à l'IRD par la Direction Technique du Haut Commissariat de l'OMVS.

Remarques formulées par la Banque Mondiale le 4/5/99

Point 1

Pas de réponse

Point 2

Pour mettre au point une modélisation pluie-débit sur des bassins de telle taille, il serait souhaitable de disposer au moins d'une dizaine d'années de données de bonne qualité, recueillies concomitamment sur au moins une dizaine de stations. Il faut savoir par ailleurs que la qualité des résultats de modélisation ne peut être garantie au moment où l'on installe un tel réseau, puisque c'est seulement après coup que l'on peut constater si les stations sont représentatives ou non.

Les crues non soutenues par le barrage présentent effectivement une concentration dans les années 80, comme en régime naturel. Il est montré dans le manuel provisoire que certains scénarios de gestion permettent cependant d'obtenir de meilleurs résultats que le régime naturel, pour lequel la fréquence de mauvaises crues s'élève à 31% sur la période 1950-1998.

Les débits soutenus en étiage et la fréquence de défaillance correspondante sont indiqués dans le manuel provisoire de gestion, pour tous les scénarios de gestion simulés.

L'incident de transmission signalé dans le tome 2 du rapport intérimaire concerne la communication téléphonique entre IRD Montpellier et SOGEM Manantali, et non pas les liaisons radio de suivi de la situation hydrologique. Le réseau radio est doublé par des limnigraphes télétransmetteurs (système Argos) pour les 3 stations clés de Oualia, Gourbassy et Bakel.

Point 3

Pas de réponse

Point 4

Rien à signaler

Point 5

Pas de réponse

Remarques formulées par la Banque Mondiale le 11/6/99

Point 1

Il sera veillé dans la version définitive du manuel de gestion, à présenter avec plus de clarté les résultats relatifs aux simulations de scénarios.

Point 2

Pas de réponse

Remarques formulées par la SOGED le 20/5/99

Point II 1 a

La gestion spécifique du barrage de Diama sera plus particulièrement abordée lors de la troisième phase du projet.

Point II 1 b

Le manuel provisoire de gestion comporte trois parties. Les deux premières décrivent effectivement la méthode préconisée pour traduire en consignes puis en débits lâchés, les différents objectifs assignés à l'ouvrage suivant un ordre de priorité prédéfini. La valeur précise de certains paramètres de gestion, ainsi que l'ordre de priorité des consignes, ne pourront être déterminés qu'en fonction de la stratégie de gestion des eaux qui sera définie dans la future charte de l'eau.

Il n'est pas du ressort de l'IRD de décider si la gestion optimale de l'ouvrage doit viser à produire 990 Gwh/an avec 60 % de mauvaises crues, plutôt que 840 Gwh/an avec 8 % de mauvaises crues. Ce qui lui est par contre demandé, c'est d'éclairer les décideurs sur les conséquences probables de telle ou telle stratégie de gestion. Ainsi, il est présenté dans la troisième partie du rapport les résultats d'une simulation numérique de gestion effectuée sur 162 scénarios distincts. Ces scénarios qui diffèrent les uns des autres par les valeurs retenues pour les paramètres de gestion, offrent des résultats très variables pour la production d'énergie et le soutien de crue. Certains, non optimaux, peuvent être écartés d'emblée. Parmi ceux qui restent, les figures 3-2-a à 3-2-f permettent de choisir ceux qui offrent des résultats satisfaisant au mieux les objectifs des pays membres de l'OMVS. Il sera veillé à présenter ce genre de résultats avec plus de clarté dans la version définitive du manuel.

Point II 1 c

Toutes les consignes de gestion inventoriées dans la première partie du manuel, se basent sur la situation hydrologique (niveau du lac, débits aux stations, taux de pertes par évaporation), pour déterminer le débit à lâcher du barrage. Le détail des procédures est donné dans la deuxième partie.

Point II 1 d

Au stade actuel du projet, il a semblé suffisant d'envisager des objectifs de soutien d'étiage à débit constant pour faire les simulations numériques. Ceci permet déjà de présenter l'ordre de grandeur des résultats qu'on peut espérer obtenir avec l'ouvrage. Ces résultats devront bien sûr être précisés en simulant une demande variable plus proche de la réalité, dès que toutes les données nécessaires seront disponibles, en particulier pour les besoins en eau de l'agriculture irriguée et de la navigation.

Point II 1 e

L'étude menée par l'IRD pour déterminer la relation entre la forme de l'hydrogramme de crue et la superficie inondée dans le lit majeur de la vallée, n'est pas encore arrivée à son terme. Il semblerait effectivement que l'objectif de 50000 ha de cultures de décrues nécessite une crue un peu plus forte que l'hydrogramme 'ORSTOM1' culminant à 2500 m³/s pendant 6 jours. Le palier nécessaire, probablement situé entre 2500 et 3000 m³/s, reste à déterminer. Une fois qu'il le sera, on pourra alors faire les simulations nécessaires avec ce nouvel hydrogramme objectif de crue.

Point II 2 a

D'accord

Point II 2 b

Pour plus de clarté, il sera effectivement possible d'adopter les dénominations suivantes : contraintes de gestion ; consignes relatives à la sécurité de l'ouvrage ; consignes associées aux objectifs de gestion.

Remarques formulées par la KFW le 16/6/99

Point 1 1

Les valeurs de puissance moyenne journalière sont exprimées systématiquement en MW dans le document. Cela concerne les variables P et Po, représentant la puissance moyenne journalière demandée.

Les valeurs de puissance moyenne inter annuelle sont exprimées systématiquement en GwH/an. Cela concerne les variables P1 et P2. A la place, on aurait pu effectivement parler de l'énergie moyenne produite par année (W1 et W2), exprimée en GwH. Mais les deux formulations sont équivalentes, et aucune ne présente d'ambiguïté.

Point 1 2

Les caractéristiques utilisées pour les turbines sont déduites du document suivant :

Centrale hydroélectrique de Manantali. Offre N°82 97 5 . Sulzer Hydro. 13/1/95

Ce document de 2 pages indique en fonction de la chute nette, des valeurs de puissance garantie ainsi que les rendements à différentes fractions de cette dernière. Il ne précise pas s'il s'agit de puissance mécanique mesurée au niveau de l'axe des turbines, ou bien de puissance électrique mesurée à la sortie des alternateurs.

Les valeurs de puissance moyenne inter annuelle données dans la troisième partie du manuel concernent donc soit la puissance mécanique disponible sur l'axe des turbines, soit à la puissance électrique sortie des alternateurs. Les précisions nécessaires seront apportées dans la version définitive du manuel, en fonction des renseignements qui auront pu être obtenus auprès de la société Sulzer. Mais de toute façon, les résultats présentés ne tiennent pas compte des pertes dues aux transformateurs et à l'autoconsommation de la centrale, ni des pertes en ligne dues au transport de l'électricité vers des centres urbains très éloignés.

Point 1 3

La gestion préconisée repose sur des paramètres qui devront tous être déterminés en fonction de la stratégie adoptée par les états membres de l'OMVS. Ces paramètres imposent un cadre relativement figé aux opérations de gestion, avec des consignes prévues pour l'ensemble des situations pouvant se présenter.

Si ce type de gestion est adopté, la latitude de l'opérateur sera donc assez restreinte. Ce manque apparent de souplesse permet néanmoins d'optimiser la gestion de l'ouvrage sur le long terme.

Point 2 1

Rien à signaler

Point 2 2

Les relations hauteur-surface-volume sont tirées de la source suivante :

Gibb and partners. Etude de la gestion des ouvrages communs de l'OMVS. Rapport de phase 2, volume 2A. Scénarios d'utilisation de l'eau. (Annexe 6a). Juin 1987

Ce document se réfère lui-même, pour les relations en question, à la source suivante :

EDF. Plan directeur de la production et du transport. Tome 1 : moyens de production 1985.

Effectivement, on constate quelques anomalies quand on essaie de retrouver la relation $V(H)$ en intégrant la relation $S(H)$. L'IRD souhaiterait donc connaître les autres valeurs qui semble-t-il sont utilisées par la SPEBM, ainsi que leurs sources. Il faut que ce problème soit définitivement réglé avant la publication de la version définitive du manuel.

Point 2 3

Le document de Sulzer indique (page 2, ligne 3 du tableau) une puissance garantie de 41 Mw entre les chutes nettes 46 et 52 m. Cette puissance est également donnée (ligne 11 du tableau), comme limite supérieure de fonctionnement pour ces deux valeurs de chute, en régime normal exempt de cavitation. Il a donc été considéré dans le manuel provisoire de gestion, une puissance maximale productible de 41Mw par turbine.

La figure 2-3-C est donc complète, puisqu'elle indique la cote minimale qu'il est nécessaire d'avoir dans la retenue pour pouvoir produire une puissance donnée. Du fait de ce qui précède, on constate en effet qu'une cote de 202 m n'est jamais requise dans la retenue pour produire quelque puissance que ce soit, puisque la puissance maximale productible de 41 Mw peut être produite sur chacune des N turbines en marche à partir d'une cote variant de 199,78 m pour $N=1$ à 201,05 m pour $N=5$.

La figure 2-3-F aurait pu effectivement être complétée. Pour un nombre de turbines en marche inférieur à 5, les courbes de débit maximal turbiné en fonction de la cote ont été arrêtées pour les

valeurs correspondant à la puissance maximale productible. Il sera veillé dans la version définitive, à prolonger ces courbes vers les cotes élevées.

Point 3 1 et point 3 2

Concernant la production d'électricité, il est un point très important qui n'a peut-être pas été suffisamment souligné dans le manuel provisoire : celui-ci préconise d'utiliser le barrage pour assurer une production de base, et non pour satisfaire des pointes de demande.

Une fois que les moyens de production thermique existent, on peut considérer en première approximation que le coût (en litres de carburant) du kilowattheure produit par ces équipements est relativement constant, et indépendant de la date de production (heure de pointe ou non). Au contraire, le volume d'eau dépensé au barrage pour produire ce kilowattheure peut varier du simple au double selon le niveau de la surface libre du lac. Pour satisfaire la demande d'électricité au moindre coût sur le long terme, il apparaît donc qu'on a intérêt à maximiser la production moyenne réalisée au barrage. Cette maximisation peut difficilement tenir compte des pointes de demande en énergie, puisque ces dernières ne se produisent pas forcément quand les conditions de chute sont favorables.

Le mode de gestion préconisé dans le manuel consiste à ne produire une forte puissance que lorsque le lac est très haut. Pour des niveaux moyens, on envisage une puissance modérée. Quand le lac est trop bas, il n'est turbiné que le débit nécessaire à la satisfaction des autres usages. Même si le barrage de Manantali n'avait été destiné qu'à la production électrique, ces principes auraient déjà pu être avancés. Mais du fait des autres objectifs assignés à l'ouvrage, ils peuvent être doublement conseillés. En effet, ils permettent de produire en moyenne une puissance importante grâce à un niveau maintenu globalement élevé dans le lac. Le débit turbiné modéré peut alors être valorisé en grande partie une seconde fois à l'aval, pour satisfaire d'autres usages (soutien d'étiage). Au contraire, un fort débit turbiné, destiné à satisfaire une pointe de demande d'énergie, peut parfois excéder fortement la demande des autres usages. Seule une fraction de ce débit trop élevé peut alors être valorisée deux fois, le reste partant vers la mer.

Toutefois, une certaine modulation pourrait peut-être être admise en cours de journée pour suivre les pointes de demande, à condition de respecter les valeurs de débit moyen journalier imposées par les règles de gestion. Encore faudra-t-il vérifier que de telles fluctuations rapides, une fois laminées entre Manantali et Bakel, sont peu perceptibles sur les débits obtenus à l'entrée de la vallée. Il faudra également s'assurer qu'elles sont compatibles avec la sécurité des populations riveraines réparties à l'aval proche de l'ouvrage.

Enfin, les pertes en ligne par effet joule sont proportionnelles au carré de l'intensité et à la distance de transport entre les centres de production et de consommation. Ceci plaide également en faveur d'une production de pointe effectuée par les centrales thermiques, bien plus proches des villes que le barrage de Manantali. Il reste toutefois à évaluer l'importance de ces pertes.

Point 3 3

Bien que signalés par une étoile dans les tableaux 3-2-A à 3-2-C, les scénarios de gestion optimaux peuvent paraître un peu noyés au milieu de tous les résultats. Ils seront donc présentés de façon séparée dans la version définitive du manuel, de façon à guider les décideurs de façon plus claire dans leur choix de scénario.

Quant au choix lui-même, il devra être effectué par les pays membres de l'OMVS en dosant les valeurs souhaitées pour la production d'énergie et la fréquence des crues soutenues.

Remarques formulées par la DNHE du Mali, le 20/5/99

A la page 3 du manuel provisoire, il s'agit en effet de la station de Fadougou, à laquelle on a substitué deux fois par erreur le nom de Diangola. Cette erreur n'est pas reproduite dans la suite du document.

Effectivement, la station de Diangola semble tout indiquée pour le suivi du haut bassin du Bakoye. Pour gagner du temps de prévision sur le Bafing, il sera nécessaire de suivre une station située en Guinée.

Il est prévu de recalculer les modèles de propagation en utilisant les données récentes. Toutefois, ce travail ne sera effectué qu'après vérification complète de l'étalonnage des vannes de Manantali, qui permet de connaître les débits lâchés du barrage depuis 1987. Cette vérification, entamée en 1998, devrait être achevée pendant la crue de 1999.

Il y a effectivement une erreur au paragraphe 2-1-7. Dans le tableau de bas de page 11, il faut lire "Kayes naturel + Gourbassy" à la place de "Kayes naturel + Oualia". Cette erreur n'affecte que le texte, les coefficients sont justes.

Etalonnage des stations : **Pas de réponse**

Remarques formulées par la Mauritanie (22/6/99)

Tome 1

Rien à signaler

Tome 2

La détermination de l'hydrogramme objectif de crue optimal fait partie des résultats non encore acquis au moment de la rédaction du rapport intérimaire de phase 2 (mars 1999).

Tome 3

La plupart des questions soulevées trouvent leurs réponses dans la version actualisée du tome 3, distribuée lors de la réunion du Comité de Suivi du 21 Juin 1999.

Tome 4

Rien à signaler.

Tome 5

Pas de réponse

ANNEXE 5

INFLUENCE DE L'INVASION DU TYPHA

auteur : JP lamagat

RAPPEL

Lors du Comité de Suivi de juin 1999, il a été demandé à l'IRD d'effectuer une expertise sur l'envahissement de la retenue de DIAMA par le TYPHA.

BATHYMETRIE DE LA RETENUE

Afin d'évaluer l'implication possible du typha dans des modifications de courbes de remous de la retenue durant la crue, il a été réalisé une bathymétrie complète du lit du fleuve entre l'embouchure de la Tahouey, à Richard Toll (PK 0), et le barrage de DIAMA (PK 120).

100 profils en travers ont été enregistrés à l'aide du positionnement par GPS, les profils en travers étant fournis par le profileur acoustique de l'IRD.

Le profileur permet d'enregistrer les sections dans un ordinateur portable, ces profils sont stockés avec l'indication du positionnement des sections (rive gauche et rive droite) dans le système UTM – Projection 1880 – Zone 28.

Les profils ont été enregistrés jusqu'à la limite du lit mineur où débute le typha.

Le tableau n°1 ci joint montre les résultats de la bathymétrie, les colonnes intéressantes sont :

- Long-GPS : positionnement par rapport au PK 0 (en mètres) : échelle de Richard Toll fleuve.
- S : surface des sections pour chaque profil.

La carte n°1 montre l'imagerie SPOT qui couvre la zone, la date de prise des images se situe vers le 10 octobre 1998.

Les profils ont été reportés sur la figure n°2.

La figure n°3 montre principalement les variations de surfaces mouillées entre typha rive gauche et rive droite.

Il apparaît sur ce graphique établi en fonction du PK (origine Richard Toll) que la section mouillée ne présente pas de grave étranglement qui pourrait entraîner l'apparition d'une section de contrôle. Les sections les plus étroites se situent aux px suivants :

PK	Aire section en m2
18.3	2379
20.6	2648
72.8	2658
75.0	2548
88.5	2514
106.6	2434

La section moyenne s'établit entre 2800 et 3000 m² de Diama à Richard Toll. Les sections ci-dessus présentent des diminutions de section de l'ordre de 20%. Des travaux ponctuels permettraient d'agrandir ces sections mais déplaceraient le problème. En fait, il ne semble pas exister de véritable section de contrôle. L'analyse ci-dessous montre, que sur le plan des écoulements, il n'y aura pas d'incidents majeurs, par contre il est probable que sur le plan environnemental, santé, pêche, etc. il y a des inconvénients majeurs qui peuvent apparaître du fait de l'invasion du Typha.

On note que le lit mineur est capable de transiter, pour la cote 2.15 m à Diama, des débits supérieurs à 2000 m³/s tout en présentant des vitesses moyennes très inférieures à 1 m/s.

INFLUENCE DU TYPHA SUR LA COURBE DE REMOUS

Une analyse préliminaire simple a été menée en ce qui concerne de possibles relèvements des lignes d'eau dus au Typha.

La retenue de DIAMA est un cas particulier de section de contrôle dans un fleuve à très faible pente. Il en découle des avantages certains en ce qui concerne le transit des débits.

Le lit majeur est envahi et les vitesses parallèles à l'axe du fleuve peuvent être considérées comme nulles.

Les endiguements ont été normalement calculés pour une gestion de l'aménagement haute (2.5 m ?).

L'aménagement de DIAMA doit être capable de transiter des débits de fortes crues (fréquence centenaire) sans relèvement important de la ligne d'eau. D'après les observations actuelles, les mesures de débits les plus importants (2100 m³/s) n'entraînent qu'une contraction assez faible, de l'ordre de + 8 à 10 cm.

La pente du radier du fleuve sur le bief BOGHE – DIAMA est de l'ordre de 2 à 3 mm/km. La section la plus faible indiquée dans le tableau ci-dessus est de 2400 m².

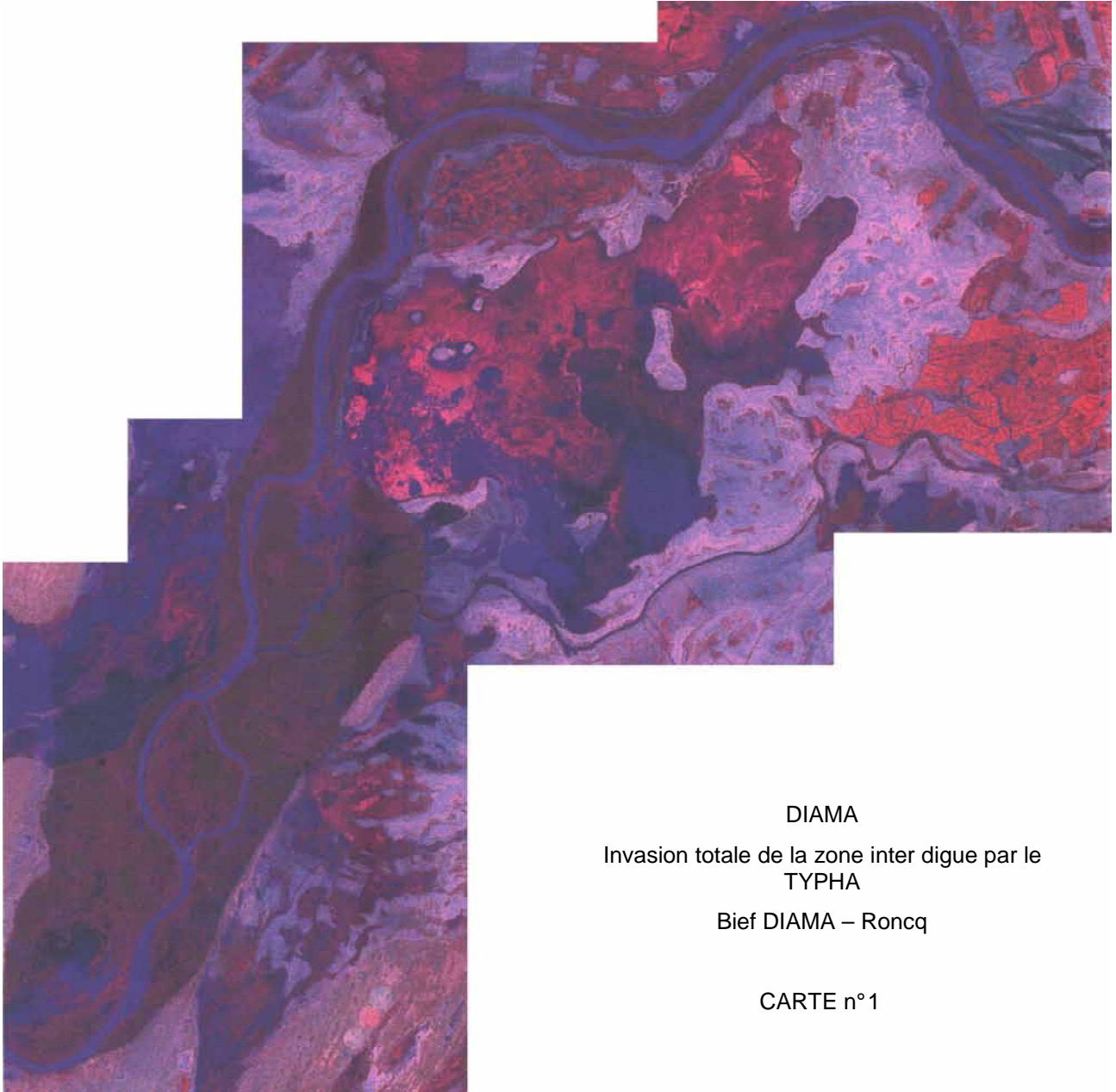
La section étant réduite au lit mineur, une augmentation de la pente hydraulique qui est quasi identique à la ligne d'eau, de 0.5 mm/km, soit 25% de la pente du fleuve, entraîne une augmentation de la vitesse moyenne dans la section minimale de contrôle de 12%. Sur la distance DIAMA RICHARD TOLL, cela correspond à une élévation de 50 mm, ce qui est faible par rapport à la revanche prévue pour le batillage.

CONCLUSION

Le diagnostic est défavorable sur le plan environnemental, mais assez neutre sur le plan des écoulements. Des mesures de débit seront effectuées pendant la crue 1999 afin de bien situer les risques éventuels sur le plan des écoulements.

Sur le plan environnemental la seule solution passe par une destruction massive du typha sur l'ensemble de la retenue, de ROSSO à DIAMA si ce n'est au-delà des digues actuelles, vers RICHARD TOLL.

Cette destruction passe dans tous les cas par une vidange temporaire de la retenue, au moment le plus propice pour l'irrigation, probablement en décembre. Une expertise devra être réalisée par un spécialiste reconnu du Typha, il indiquera quelle est le protocole à suivre pour la destruction de cette plante.



DIAMA
Invasion totale de la zone inter digue par le
TYPHA
Bief DIAMA – Roncq

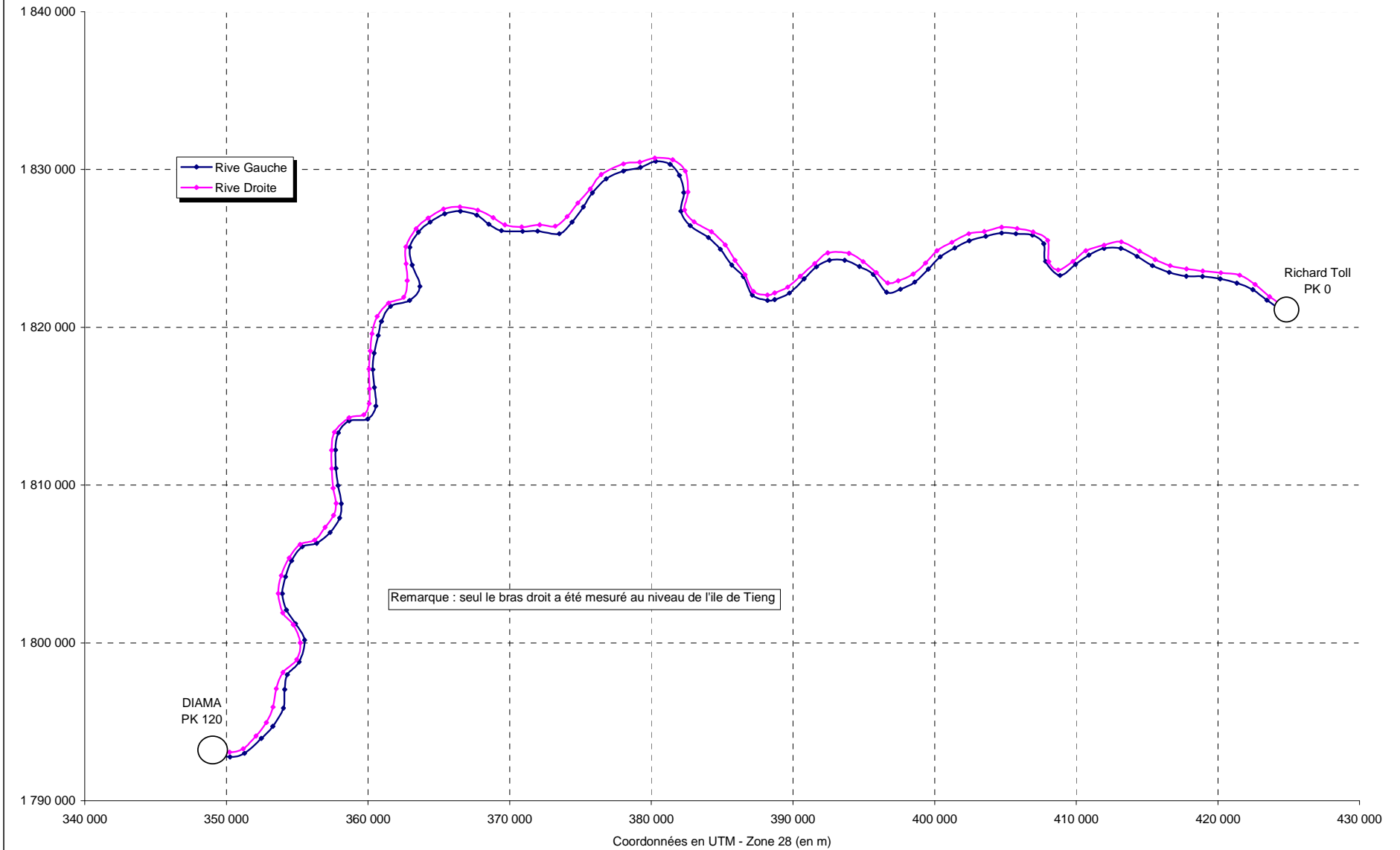
CARTE n°1

BATHYMETRIE DE LA RETENUE DE DIAMA - Tableau n°1

Ordre	N°	Rive	RGEst	RGNord	RDEst	RDNord	Larg-GPS	Long-GPS	Dist-Bateau	Largeur	Z RG	Z RD	Z max	Z moy	S	Ec mx	Tendance
0	0	G	424 593	1 821 042	424 699	1 821 297	276.15	0.00	270.65	267.47	5.64	1.74	13.05	9.23	2468	8.81	2663.30
1	1	D	423 475	1 821 717	423 671	1 821 936	293.90	1258.16	281.03	280.65	2.36	2.36	13.4	9.13	2564	3.65	2669.81
2	2	G	422 475	1 822 387	422 630	1 822 722	369.12	2511.72	354.57	351.91	1.51	1.35	9.42	4.77	2593	11.89	2676.23
3	3	D	421 349	1 822 805	421 549	1 823 308	541.30	3724.04	530.47	525.11	1.7	1.69	12.97	5.49	2884	16.84	2682.39
4	4	G	420 182	1 823 081	420 215	1 823 458	378.44	4992.55	346.56	343.72	1.66	1.81	12.39	7.6	2614	14.89	2688.76
5	5	D	418 920	1 823 235	418 944	1 823 576	341.84	6266.33	317.34	313.6	1.73	1.62	13.22	8.13	2548	7.24	2695.10
6	6	G	417 780	1 823 242	417 794	1 823 705	463.21	7413.35	439.21	432.59	1.58	1.81	10.6	6.39	2765	20.42	2700.75
7	7	D	416 573	1 823 485	416 636	1 823 908	427.67	8616.69	440.77	429.93	0.75	1.23	9.44	6.67	2867	39.41	2706.62
8	8	G	415 385	1 823 916	415 579	1 824 290	421.32	9810.53	441.99	439.8	1.56	1.67	10.65	6.45	2835	18.31	2712.39
9	9	D	414 296	1 824 501	414 478	1 824 825	371.62	11040.42	375.82	366.93	1.75	1.81	11.27	7.3	2680	29.01	2718.27
10	10	G	413 159	1 825 012	413 181	1 825 423	411.59	12377.79	422.73	414.83	1.67	1.25	15.63	7.25	3007	33.32	2724.60
11	11	D	411 959	1 825 006	411 974	1 825 217	211.53	13585.95	231.13	227.54	1.82	1.76	16.71	11.05	2514	7.64	2730.26
12	12	G	410 891	1 824 589	410 687	1 824 855	335.22	14826.20	324.13	315.61	1.79	1.73	12.81	8.3	2621	26.18	2736.00
13	13	D	409 959	1 823 998	409 776	1 824 193	267.42	15940.50	274.88	258.69	1.41	1.95	14.61	9.54	2469	34.64	2741.11
14	14	G	408 858	1 823 295	408 729	1 823 638	366.46	17185.13	380.03	369.33	1.68	1.4	12	7.85	2898	38.45	2746.76
15	15	D	407 831	1 824 193	408 058	1 824 176	227.64	18297.03	280.07	227.01	2.13	1.58	16.01	10.48	2379	5.02	2751.75
16	16	G	407 709	1 825 297	407 977	1 825 516	346.10	19523.24	340.29	338.34	1.64	1.68	12.12	8.66	2928	10.62	2757.20
17	17	D	406 914	1 825 846	406 961	1 826 053	212.27	20579.07	212.26	209.74	1.23	1.89	18.97	12.62	2648	6.14	2761.84
18	18	G	405 735	1 825 946	405 840	1 826 271	341.54	21740.01	339.48	331.41	1.53	1.73	11.06	8.23	2729	25.01	2766.90
19	19	D	404 730	1 825 980	404 731	1 826 351	371.00	22798.55	404.28	398.02	1.72	1.2	9.92	7.08	2820	12.91	2771.46
20	20	G	403 620	1 825 777	403 518	1 826 082	321.60	23983.78	355.03	348.01	1.5	1.82	13.87	7.53	2620	22.75	2776.51
21	21	D	402 440	1 825 494	402 418	1 825 943	449.54	25143.14	463.48	458.03	1.57	1.83	8.78	6.29	2881	13.58	2781.40
22	22	G	401 422	1 825 041	401 228	1 825 390	399.30	26356.33	383.74	377.22	1.73	1.21	10.73	7.04	2657	6.86	2786.46
23	23	D	400 406	1 824 478	400 175	1 824 860	446.41	27526.31	441.71	437.21	1.66	1.66	8.31	6.35	2775	4.28	2791.28
24	24	G	399 559	1 823 688	399 368	1 824 074	430.67	28668.62	397.69	390.74	1.66	1.54	10.28	7.17	2803	16.28	2795.94
25	25	D	398 599	1 822 866	398 500	1 823 380	523.45	29856.04	509.63	501.35	1.77	1.76	8.1	6.2	3109	31.98	2800.72
26	26	G	397 600	1 822 420	397 435	1 822 961	565.60	30975.00	573.22	563.27	1.19	1.8	9.94	5.41	3050	25.59	2805.18
27	27	G	396 623	1 822 227	396 701	1 822 814	592.16	31847.23	599.54	592.16	1.94	2.23	8.71	5.27	3120	36.11	2808.62
28	28	D	395 670	1 823 345	395 888	1 823 479	255.89	33102.01	271.48	267.68	2.7	1.58	16.31	10.2	2730	8.25	2813.52
29	29	G	394 698	1 823 856	394 955	1 824 170	405.76	34228.26	428.29	426.49	0.99	2.09	9.25	6.79	2895	14.3	2817.86
30	31	D	393 657	1 824 261	393 961	1 824 696	530.70	35347.19	570.53	558.88	1.55	1.71	10.15	5.95	3327	50.77	2822.12
31	32	G	392 575	1 824 250	392 464	1 824 727	489.74	36636.73	466.26	461.9	1.38	1.74	11.91	6.16	2844	21.85	2826.97
32	33	D	391 661	1 823 851	391 545	1 824 054	233.81	37698.46	249.31	240.6	1.56	1.8	18.54	11.22	2700	22.28	2830.91
33	34	G	390 788	1 823 078	390 512	1 823 242	231.05	38937.92	313.12	311.24	1.72	1.61	12.05	8.74	2719	10.2	2835.45
34	35	D	389 752	1 822 178	389 628	1 822 556	397.82	40183.09	393.1	385.14	1.6	1.71	11.58	7.99	3078	25.85	2839.96
35	36	G	388 722	1 821 769	388 712	1 822 190	421.12	41230.41	419.28	416.93	1.82	1.38	15.19	7.08	2952	6.5	2843.70
36	37	D	388 217	1 821 712	388 203	1 822 056	344.28	41746.33	423.24	400.52	1.64	1.82	15.72	7.19	2878	60.74	2845.53
37	38	G	387 124	1 822 049	387 202	1 822 289	252.36	42831.42	266.55	260.62	1.27	2.27	16.83	10.04	2617	23.88	2849.33
38	40	D	386 491	1 823 222	386 632	1 823 340	183.86	44095.68	219.13	213.61	2.32	1.78	17.33	12.35	2638	6.99	2853.71
39	41	G	385 681	1 823 954	385 911	1 824 259	382.00	45221.49	387.3	384.48	1.55	1.73	13.9	7.63	2934	14.79	2857.55
40	42	D	384 876	1 824 960	385 215	1 825 226	430.90	46461.02	450.97	441.86	1.75	1.87	8.84	6.88	3040	11.69	2861.72
41	43	G	384 033	1 825 698	384 238	1 826 060	416.02	47663.47	361.75	359.16	1.81	1.52	11.59	7.8	2801	2.66	2865.71
42	44	D	382 752	1 826 444	383 020	1 826 693	365.82	49090.59	361.75	359.16	1.52	1.81	11.59	7.8	2801	2.66	2870.37
43	45	G	382 101	1 827 359	382 357	1 827 441	268.81	50150.32	255.96	252.29	1.66	2.1	16.67	10.96	2765	13.37	2873.78
44	46	D	382 289	1 828 537	382 586	1 828 578	299.82	51326.45	341.42	331.18	2.48	1.85	12.14	8.42	2789	30.01	2877.51
45	47	G	381 980	1 829 638	382 404	1 829 911	504.29	52567.97	496.19	495.46	1.26	1.51	16.7	5.78	2876	6.45	2881.39
46	48	D	381 327	1 830 332	381 508	1 830 621	341.00	53613.27	390.56	389.22	1.76	1.58	20.07	7.27	2831	8.91	2884.60
47	49	G	380 312	1 830 522	380 247	1 830 733	220.78	54761.24	294.71	274.02	1.6	1.95	16.73	9.76	2675	45.81	2888.08
48	50	D	379 246	1 830 140	379 173	1 830 469	337.00	55878.93	344.2	331.29	1.7	1.79	10.66	8.52	2822	41.15	2891.42
49	52	D	378 039	1 829 903	378 028	1 830 364	461.13	57067.30	499.74	491.79	1.53	1.44	10.42	6.42	3159	8.18	2894.92
50	53	G	376 811	1 829 413	376 461	1 829 684	442.65	58582.30	466.76	460.05	1.61	1.16	13.35	6.88	3164	19.32	2899.29
51	54	D	375 833	1 828 525	375 687	1 828 770	285.20	59838.95	291.73	282.52	1.86	1.48	15.69	9.59	2710	27.82	2902.85
52	55	G	375 194	1 827 635	374 822	1 827 886	448.76	61001.83	403.57	391.74	1.65	1.62	9.68	7.37	2889	42.94	2906.09
53	56	D	374 408	1 826 683	374 056	1 827 019	486.62	62197.39	521.56	516.15	2.19	1.79	7.65	5.62	2900	19.37	2909.36
54	57	G	373 506	1 825 946	373 210	1 826 415	554.60	63298.95	571.41	562.08	1.88	1.9	11.13	5.37	3018	22.2	2912.32
55	58	D	371 985	1 826 108	372 123	1 826 503	418.41	64608.93	433.36	427.08	1.62	1.79	13.04	6.99	2983	25.21	2915.78
56	59	G	370 914	1 826 083	370 843	1 826 363	288.86	65787.32	332.55	311.22	1.83	1.76	14.27	8.95	2786	48.06	2918.83
57	60	D	369 416	1 826 133	369 661	1 826 501	442.10	67130.62	465.78	460.83	1.62	1.69	13.36	6.79	3127	20.1	2922.25
58	61	G	368 528	1 826 548	368 837	1 826 946	503.87	68088.55	469.98	466.2	2.15	1.88	13.03	6.57	3061	3.13	2924.64
59	62	D	367 681	1 827 114	367 755	1 827 432	326.50	69187.16	313.2	309.18	1.89	1.9	14.27	9.38	2900	14.75	2927.34
60	63	G	366 513	1 827 360	366 485	1 827 641	282.39	70427.20	302.54	298.71	1.8	1.83	15.98	9.11	2720	13.06	2930.32
61	64	D	365 414	1 827 205	365 328	1 827 494	301.52	71565.26	285.93	281.67	1.99	1.44	14.85	9.71	2734	15.52	2933.01
62	65	G	364 387	1 826 680	364 241	1 826 931	290.37	72754.04	274.64	270.61	2.19	2.12	14.21	9.82	2658	6.23	2935.76
63	66	D	363 560	1 826 029	363 392	1 826 255	281.60	73822.91	300.42	297.56	2.19	1.78	13.9	9.13	2717	10.79	2938.18
64	67	G	362 951	1 825 081	362 677	1 825 110	2										

BATHYMETRIE DU BIEF RICHARD TOLL - DIAMA

Figure n°2



BATHYMETRIE DU BIEF RICHARD TOLL - DIAMA

Figure n°3

