

Gestion intégrée des ressources en eau du bassin du Sénégal

Programme d'optimisation de la gestion des réservoirs

Jean Pierre LAMAGAT*, Jean Claude BADER**

*IRD Dakar, Sénégal

**IRD Montpellier, France

Résumé — Afin d'optimiser la gestion des aménagements dépendant de l'Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal – OMVS – l'IRD s'est vu confier la mise en œuvre du Programme d'optimisation de la gestion des réservoirs. Un aspect très important du projet concernait l'étude du soutien de crue destiné aux cultures de décrue, très concurrentiel avec les autres objectifs assignés au barrage de Manantali (soutien d'étiage, hydroélectricité). La première partie, résumé du rapport de synthèse de fin de projet, décrit l'optimisation d'un hydrogramme objectif de crue réalisée en croisant deux méthodologies originales : la modélisation par analyse des temps de propagation et l'analyse des images satellitaires. Par simulation d'une large gamme de scénarios de gestion, la seconde partie quantifie à partir de la ressource en eau disponible les résultats pouvant être simultanément obtenus en matière de débit garanti pour l'irrigation (soutien d'étiage), de superficies de cultures de décrue (soutien de crue) et de production d'énergie. Les résultats du POGR, validés par cinq années d'utilisation des logiciels fournis par l'IRD (1999 à 2003) constituent une aide précieuse pour la gestion en temps réel et pour le choix d'une stratégie de gestion des barrages de l'OMVS. Les méthodes d'analyse et les logiciels développés dans le cadre du projet peuvent être aisément transposés sur d'autres bassins.

Abstract — **Integrated water resources Management of the basin of Senegal.** To optimise management of the dams of Organisation for the development of the river Senegal (OMVS) IRD has developed the Program Optimisation of dams Management. An important part of the project concerned the study of flood support, made for floodplain cropping, which is very rival with the other objectives of Manantali dam (low water support and energy production) The first part, summary of the end synthesis report of the project, describes the optimisation of a flood hydrograph which is realised by crossing two originals modelling methodologies using analysis of propagation times and analysis of satellite scenes. By simulation of a large range of management scenarios, the second part quantifies the results that can be obtained according with the available resource, concerning warranty discharge for irrigation (support of low water), areas of flood plain cropping (flood support) and energy production. The results of POGR, validated by using since five years of software developed by IRD (1999 to 2003), represent a precious help for the real time management and for choosing a management strategy of the OMVS dams. The analyse methods and the softwares developed can be easily transposed on other basins.

Optimisation d'un hydrogramme objectif de crue

Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal - OMVS

L'Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal (OMVS), créée le 11 mars 1972, regroupe les trois pays riverains du fleuve : Mali, Mauritanie, Sénégal. Sous son impulsion deux barrages, Manantali et Diama ont été réalisés et permettent depuis 1988 une régularisation partielle du fleuve. La gestion de ces deux ouvrages est assurée par deux sociétés autonomes : la Société de gestion du barrage de Diama (SOGED) et la Société de gestion du barrage de Manantali (SOGEM).

Un projet d'alimentation en énergie des trois pays à partir du barrage de Manantali a été réalisé à la suite d'études menées dans le cadre du Programme d'optimisation de la gestion des réservoirs – POGR mis en œuvre par l'IRD sur financements conjoints, principalement Fonds d'aide et coopération (FAC) et Banque mondiale.

L'OMVS doit veiller à ce que la gestion des deux barrages assure : la production électrique, le développement de l'agriculture, la fourniture d'eau aux populations et à terme la navigation fluviale, tout en minimisant les impacts négatifs sur l'environnement : cultures de décrue - pêche – pâturages – forêts – nappes – santé - ...

Le Haut Commissariat de l'OMVS est la seule structure administrative commune aux trois pays riverains. Il doit avoir un rôle important dans la répartition et la gestion des eaux du fleuve, dans la coordination des politiques de développement économique dans la vallée et le suivi de leurs effets sur l'environnement.

En 1997, à la suite d'une série d'études de la production d'énergie peu concluantes en matière économique, il a été demandé à l'équipe IRD, qui avait précédemment travaillé avec la Société Alexander GIBB à la mise au point d'un système de gestion, de reprendre ses analyses d'optimisation de gestion de la ressource afin d'optimiser la production énergétique tout en proposant des scénarios optimisés dans le domaine de l'atténuation des impacts sur l'environnement du bassin fluvial.

Programme d'optimisation de la gestion des réservoirs – POGR

Le POGR est l'un des volets d'un projet : le Programme d'atténuation et de suivi des impacts sur l'environnement (PASIE) contenant les études de tous les paramètres environnementaux susceptibles d'être modifiés par les effets anthropiques.

Ces études d'accompagnement du POGR, incluses dans le PASIE, n'ont pas été menées préalablement à ce dernier, comme elles auraient dû l'être. Les résultats obtenus ne sont donc pas optimisés pour les contraintes autres que les cultures de décrue.

Le critère retenu s'est résumé à la garantie d'une crue artificielle permettant d'assurer un potentiel cultivable en décrue de 50 000 ha, ce qui impose une submersion de 25 à 30 jours des terres afin que la recharge en eau des sols permette d'assurer la maturation des récoltes.

La vallée du Sénégal, à l'aval de Bakel présente un cadre géomorphologique dont les paramètres ont été calibrés par les crues du passé, quelques centaines de milliers ou de millions d'années. Il est raisonnable de penser que les contraintes non étudiées à ce jour ont des caractéristiques statistiques liées à celles des crues et des surfaces inondées. L'étude statistique de l'inondation du lit majeur, présentée plus bas montre que la crue optimisée (l'objectif « optimisation » a été évalué durant la sécheresse, il s'agit donc d'un minimum de survie pour les agriculteurs de la vallée), correspond à une période de retour proche de 1 année sur 6 ou 7, soit une fréquence au dépassement de 85 %. L'objectif est donc minimal, et il est à espérer que la gestion conduise à des choix beaucoup plus optimistes.

Après quatre années de travaux et d'études dans le domaine de l'analyse hydrologique du fleuve, la gestion des barrages a atteint l'objectif des termes de références initiaux : gérer la retenue de Manantali suivant un scénario annuel choisi, dont une crue « crue artificielle », avec une minimisation optimale des impacts négatifs.

Le document de synthèse (Lamagat *et al.*, 2001) contient deux séries de limnigrammes à la station de Bakel qui correspondent aux objectifs fixés. Ils correspondent aux scénarios à assurer à cette station pour obtenir des potentiels de surfaces cultivables en décrue variant de 45 000 à 70 000 ha. Les études concernant l'inondation du lit majeur ont été menées sur la zone « normalisée » correspondant au bief Matam – Dagana.

L'optimisation des scénarios a été réalisée à partir des données d'observations ou d'analyses suivantes :

- imagerie satellitaire pour les surfaces inondées ;
- observations du lit majeur sur dix sites représentatifs ;
- modélisation de la mise en eau du lit majeur ;
- relation entre sites observés et inondation maximale ;
- constitution d'un échantillon d'inondation du lit majeur : 1904-2000 ;
- enquêtes sur les surfaces cultivées en décrue de 1946 à 2000 ;
- relation surfaces cultivées – inondation maximale ;
- relation intensité/forme du limnigramme à Bakel avec surfaces cultivées ;
- établissement de limnigrammes garantissant une submersion utile de 25 et 30 jours pour un potentiel cultivable allant de 45 000 ha à 70 000 ha sur le bief Matam – Dagana.

Le schéma des études est resté prudent, il a écarté en rive droite les cultures de Boghe et Kaedi, déjà aménagées, ainsi que la partie de la vallée située à l'amont de Matam, partie représentant environ 19 % de partie située à l'aval.

Les limnigrammes et hydrogrammes de Bakel sont optimisés pour obtenir un maximum d'inondation avec un minimum de ressource en eaux. Un choix est nécessaire le 19 août, la veille du début des éventuels lâchés, afin de choisir un objectif de surface potentiellement cultivable en fonction de la ressource en eau disponible : état de la retenue – Hydraulicité des affluents non contrôlés.

Les dernières enquêtes réalisées pendant la décrue 2000-2001 (SAED-IWMI-ADRAO) montrent qu'une submersion de 25 jours est suffisante pour assurer un rendement correct de récolte en décrue. Jusqu'à nouvel ordre il est recommandé d'utiliser ce seuil pour les points les plus hauts des zones cultivables.

Les analyses ont été menées à partir de la moyenne des surfaces cultivées en décrue, en fait, il serait plus logique de prendre comme base des analyses la courbe enveloppe de 80 % des surfaces cultivées. En utilisant la moyenne, il est probable que des paramètres indépendants de la ressource, c'est-à-dire de l'hydraulicité de la crue, interviennent et faussent la notion de potentiel cultivable. Le tableau I ci-dessous montre l'écart existant entre les volumes de crue issus des deux bases d'analyse, moyenne et 80 % des surfaces cultivées (base 50 000 ha – 30 jours de submersion).

Tableau I. Gains de l'optimisation - cultures de décrue.

PERIODE A FAIBLE HYDRAULICITE - Fréquence<=0.33 - Période de retour 1 année sur 3							
Submersion 25 jours - Décrue rapide - Débit de soutien stoppé au 1er octobre							
Volumes en 10 ⁹ m ³							
Surface cultivable	45 000 ha	50 000 ha	55 000 ha	60 000 ha	65 000 ha	70 000 ha	75 000 ha
Risque faible - Enveloppe 50% des cultures observées	4.184	4.428	4.661	4.904	5.166	5.444	5.751
Gain par rapport à la crue type GIBB/IRD1 - 50 000 ha	2.404	2.160	1.927	1.684	1.422	1.144	0.837
Risque moyen - Enveloppe 80% des cultures observées	3.909	4.131	4.377	4.613	4.866	5.115	5.383
Gain par rapport à la crue type GIBB/IRD1 - 50 000 ha	2.679	2.457	2.211	1.975	1.722	1.473	1.205
PERIODE A FAIBLE HYDRAULICITE - Fréquence>0.33 - Période de retour 2 années sur 3							
Submersion 30 jours - Décrue moyenne - Débit de soutien stoppé au 12 octobre							
Surface cultivable	45 000 ha	50 000 ha	55 000 ha	60 000 ha	65 000 ha	70 000 ha	75 000 ha
Risque faible - Enveloppe 50% des cultures observées	4.613	4.876	5.138	5.416	5.709	6.028	6.436
Gain par rapport à la crue type GIBB/IRD1 - 50 000 ha	1.975	1.712	1.450	1.172	0.879	0.560	0.152
Risque moyen - Enveloppe 80% des cultures observées	4.308	4.523	4.826	5.090	5.363	5.652	6.317
Gain par rapport à la crue type GIBB/IRD1 - 50 000 ha	2.280	2.065	1.762	1.498	1.225	0.936	0.271

Méthodologies d'analyses et données d'observations

Les réservoirs (figure 1)

- Diama (PK 28) : le barrage de Diama est situé à 28 km à l'amont de Saint-Louis, soit à environ 56 km de l'estuaire naturel du fleuve. Au départ, il s'agissait d'un ouvrage anti-sel qui a été reconverti. Prévu pour être géré à la cote 0,5 m, grâce à deux endiguements de 120 km, il est actuellement maintenu en quasi permanence à la cote 2,15 m, ce qui permet l'irrigation gravitaire du delta du fleuve entre Rosso et le barrage. Sa courbe de remous remonte à l'amont de Boghé (PK 379).

- **Manantali** : le barrage est situé sur l’affluent principal du Sénégal, le Bafing. Il s’agit d’un barrage poids, dont la retenue atteint 12 km^3 et la tranche utile, comprise entre les niveaux 187,00 m et 208,05 m atteint 8 km^3 . Il est équipé de 5 groupes de 41 MW chacun. La surface de la retenue est de l’ordre de 500 km^2 lorsque la retenue est pleine. Le site contrôle entre 50 et 60 % des volumes transitant à la station d’entrée de la vallée : Bakel.



Figure 1. Carte du bassin du fleuve Sénégal.

Paramètres de l’optimisation

L’imagerie satellitaire pour les surfaces inondées

Six couvertures de crues ont été acquises auprès de SPOTIMAGE (1986 à 1999). A partir d’analyses réalisées sous Arcview, elles ont servi à calculer les aires des 10 plaines observées sur le plan hydrologique ainsi que les aires globales de l’inondation du lit majeur pour le bief Matam – Dagana. Des corrections de date de prise de vue ont été faites afin d’obtenir les surfaces maximales inondées.

Une relation a été établie entre l’inondation du bief et celle des dix plaines.

Observations du lit majeur sur dix sites représentatifs (figure 2)

Dix échelles de crues ont été observées durant le remplissage et la vidange des plaines choisies pendant les crues 1997 à 1999.

Modélisation de la mise en eau du lit majeur

A l’aide des observations réalisées durant les crues 1997 et 1998, un modèle de propagation a été calibré pour chaque plaine observée. Ce modèle permet de connaître le niveau de l’eau dans la plaine en fonction de celui du fleuve à la station principale la plus proche. La précision de ces modèles est remarquable, de l’ordre du cm. Elle permet de reconstituer toutes les inondations de ces plaines depuis 1904. (figure 3).

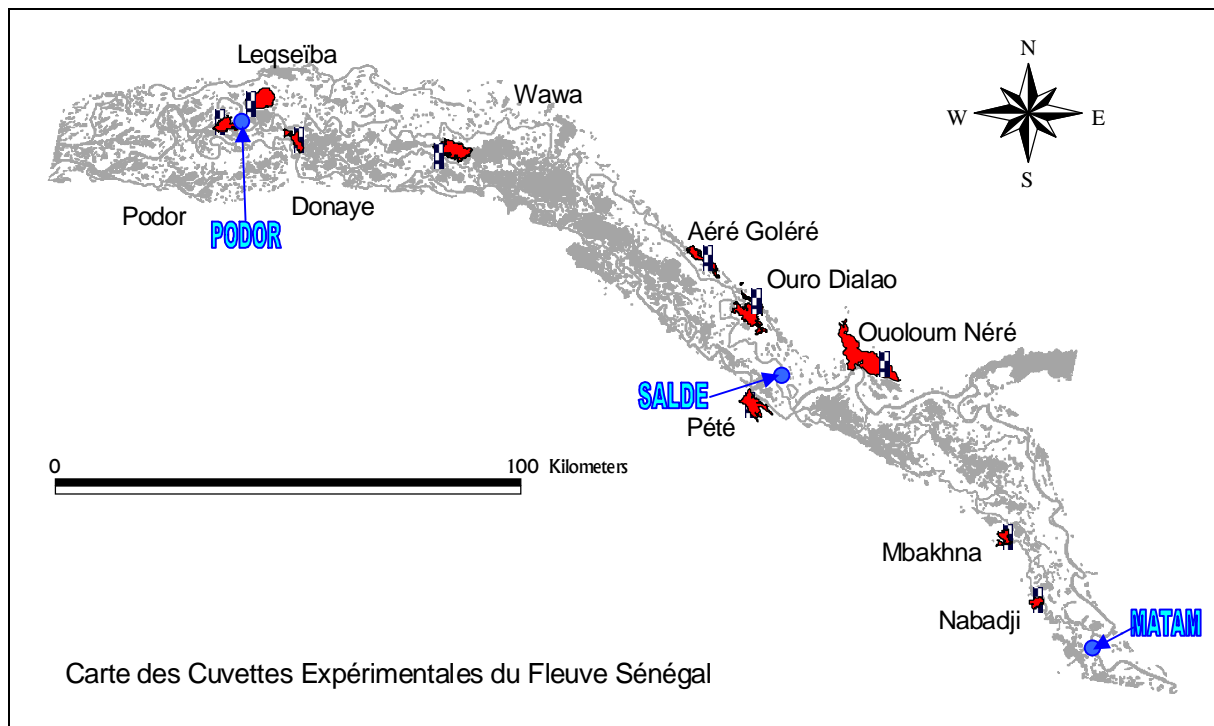


Figure 2. Implantation des plaines observées de 1997 à 1999.

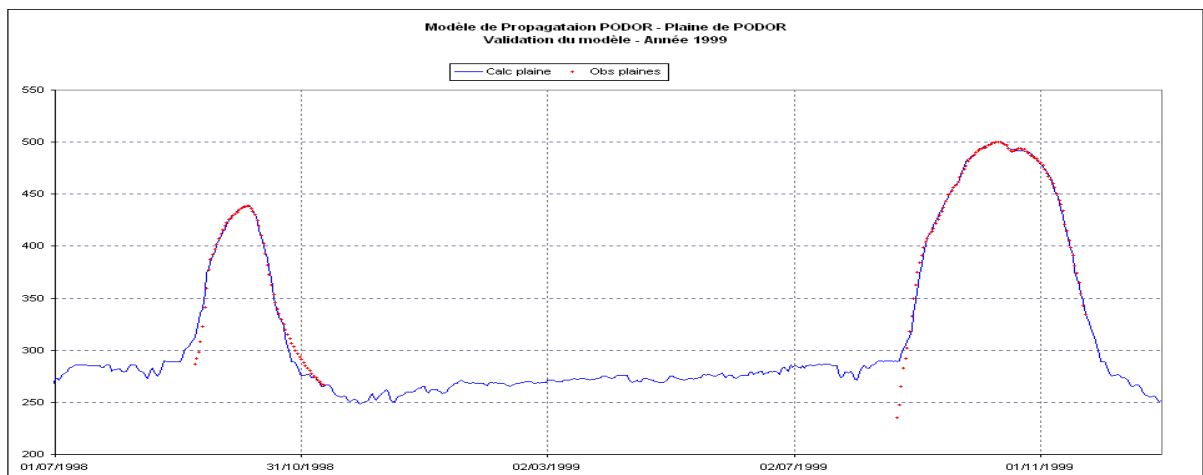


Figure 3. Validation du modèle de remplissage de la plaine de Podor (Base échelle de Podor).

Relation entre superficies inondées des sites observés et de l'ensemble du lit majeur

L'étude des diverses aires inondées observées sur les couvertures satellite a permis d'établir la relation représentée sur la figure 4.

Constitution d'un échantillon d'inondation du lit majeur : 1904 – 2000

Un modèle de propagation permettant de reconstituer les crues dans le lit mineur a été établi entre Bakel et les stations principales de l'aval, Matam, Saldé et Podor (figure 5). Ainsi il a été possible de reconstituer des échantillons complets de crues à ces stations depuis 1904 et donc les superficies inondées sur les 10 plaines et l'ensemble du lit majeur (grâce aux relations précédentes). La figure 6 représente la correspondance existant entre la surface maximale inondée du lit majeur et la cote maximale annuelle à la station de Podor.

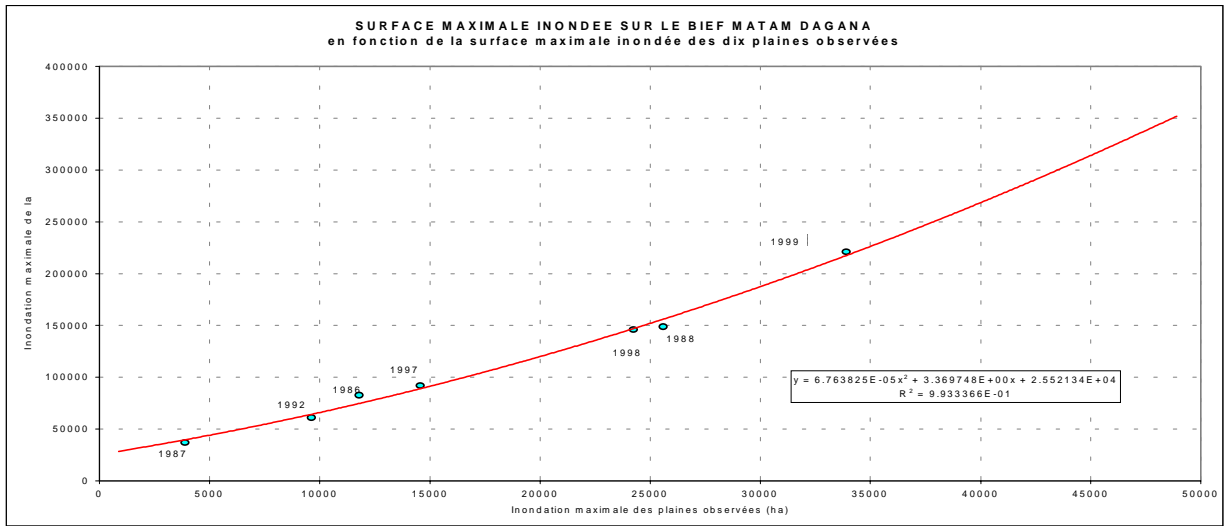


Figure 4. Relation entre aires inondées : plaines observées – lit majeur Matam - Dagana.

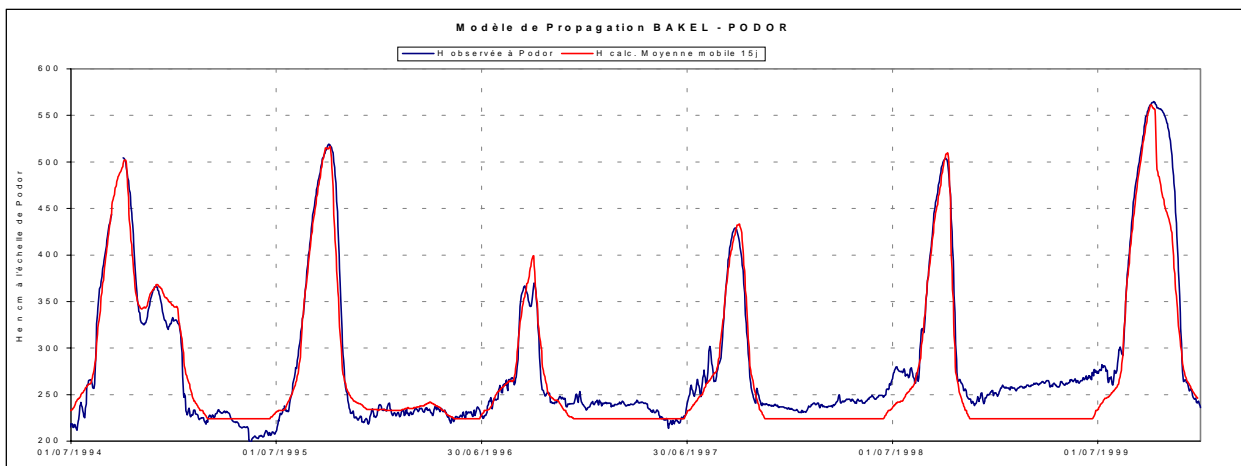


Figure 5. Validation du modèle de propagation Bakel – Podor.

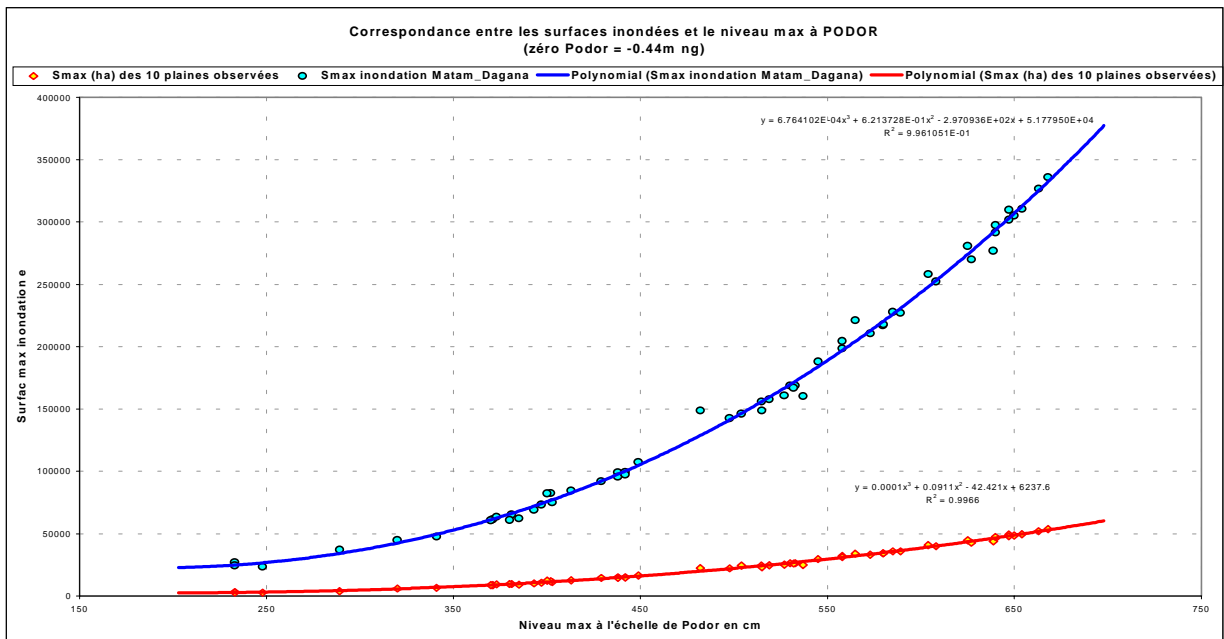


Figure 6. Relations entre Hmax annuel à Podor et inondations maximales plaines et lit majeur.

Enquêtes sur les surfaces cultivées en décrue de 1946 à 2000

Parallèlement aux analyses développées ci-dessus, une équipe d'agronomes a compilé les archives des services nationaux de l'agriculture afin de quantifier les surfaces mise en cultures de décrue pour chaque année durant la période 1946 – 1999. Les valeurs ont été critiquées et ramenées au bief étudié.

Relation surfaces cultivées – inondation maximale

La figure 7 présente la relation existante entre ces surfaces et l'inondation maximale correspondante.

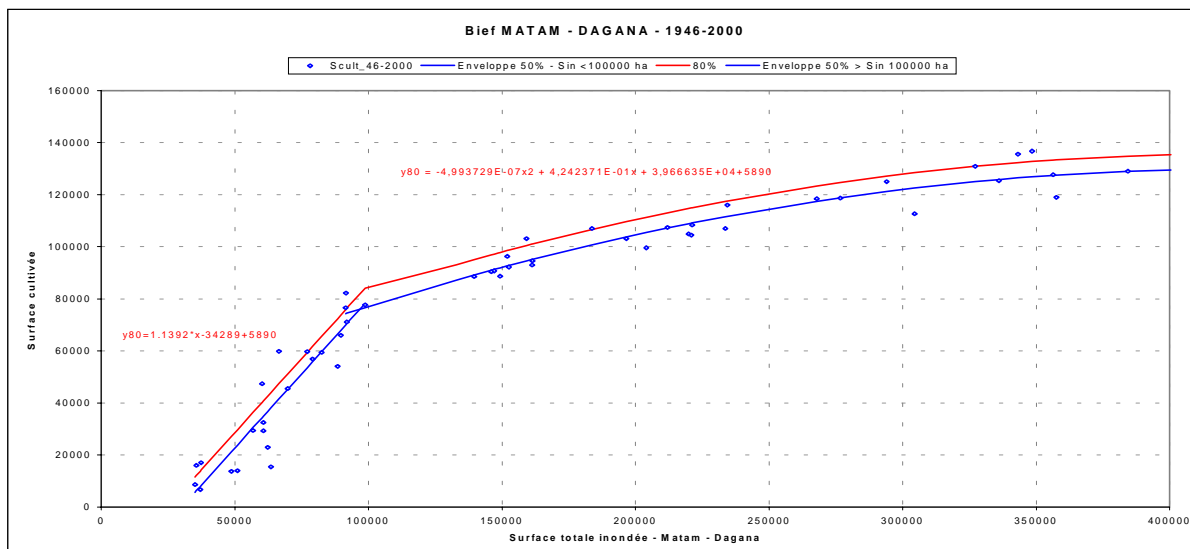


Figure 7. Relations entre surfaces cultivées et surfaces inondées – Potentiels cultivables 50 et 90%

Relation entre le limnigramme à Bakel et le potentiel cultivable

Une relation optimale a été établie entre la hauteur moyenne dépassée durant n jours et la surface cultivée. En prenant comme valeurs de base n = 6 puis 10 et ensuite en incrémentant cette valeur de 5 jours jusqu'à 60 jours un tableau de correspondance a été créé entre n et la surface potentiellement cultivable (tableau II).

Tableau II. Surface cultivable en fonction de la hauteurs moyenne dépassée n jours

POTENTIEL SURFACE CULTIVABLE GARANTIE A 80%- 1946-2000													
Scult	Nj	6j	10j	15j	20j	25j	30j	35j	40j	45j	50j	55j	60j
25000	575	561	548	536	524	512	501	491	481	472	464	457	
30000	610	594	579	565	551	537	525	513	502	492	482	474	
35000	643	624	608	593	576	561	547	534	522	510	500	490	
40000	673	653	635	618	600	583	568	554	541	528	517	507	
45000	701	680	660	642	623	605	588	573	559	546	534	523	
50000	727	705	684	665	644	625	608	593	578	564	551	540	
55000	752	730	708	686	665	646	628	612	596	582	569	556	
60000	776	754	730	708	686	666	648	631	615	601	587	574	
65000	799	777	753	729	707	686	668	651	635	620	606	592	
70000	822	800	775	751	728	707	689	672	656	640	626	612	
75000	846	824	798	774	750	729	711	693	677	662	647	632	
80000	869	848	822	797	774	752	734	717	700	685	670	655	
85000	893	873	847	822	798	777	759	742	725	709	694	679	
90000	919	899	873	848	825	804	785	768	752	736	721	705	
95000	946	927	901	876	853	833	815	798	781	765	750	734	
100000	975	957	932	907	884	864	846	829	813	797	781	765	

Etablissement de limnigrammes garantissant une submersion utile de 25 et 30 jours pour un potentiel cultivable allant de 45 000 ha à 70 000 ha sur le bief Matam – Dagana

A partir de ce tableau le limnigramme correspondant au scénario optimal est reconstitué du jour 1 au jour 60 à partir du début de la crue artificielle. La figure 8 montre les différents scénarios optimisés en fonction de la surface potentiellement cultivable voulue.

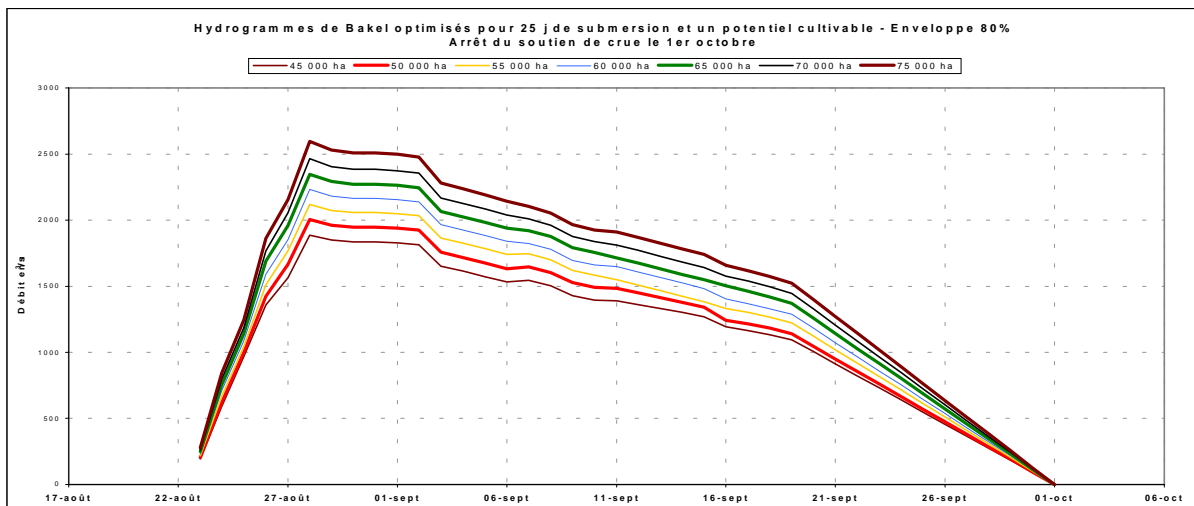


Figure 8. Limnigrammes optimisés de Bakel garantissant une surface potentiellement cultivable en décrue.

Le tableau 1 montre les gains en économie d'eau obtenus grâce à l'optimisation. En particulier, pour la crue garantissant 50 000 ha de cultures, l'économie est évaluée à 2.5 km³, soit une possibilité de soutien de crue à l'étiage de 145 m³/s supplémentaire sur 200 jours. Ce qui permet d'assurer le fonctionnement de la navigation (débit \geq 300 m³/s).

Simulation de scénarios de gestion

Objectif

En cas de faible hydraulicité, une rivalité s'établit entre les objectifs assignés au barrage de Manantali. En particulier, le soutien de crue peut nécessiter des débits lâchés trop forts pour être totalement turbinés. Dans quelle mesure le barrage de Manantali permet-il d'envisager à la fois une forte production d'énergie, le développement de l'agriculture irriguée dans la vallée (par soutien d'étiage) et le maintien de superficies suffisantes de cultures de décrue dans le lit majeur (par soutien des faibles crues) ? L'analyse présentée ici vise à apporter des éléments de réponse chiffrés à cette question.

Pour le soutien d'étiage, la règle consiste d'une part à viser à Bakel un hydrogramme objectif d'étiage à hauteur des besoins prévus, et d'autre part à garder un stock suffisant, variable dans l'année, permettant d'atteindre cet objectif avec un faible taux de défaillance.

Pour le soutien de crue, la règle préconisée par le POGR consiste à viser à Bakel un hydrogramme objectif de crue prédéfini associé à une superficie S_c de cultures de décrue. Le soutien est déclenché à la date optimale du 20 août (minimisant en moyenne les volumes lâchés non turbinés) uniquement si le plan d'eau de Manantali se situe à cette date au dessus d'un seuil H_s prédéfini.

Il s'agit ici de tester par simulation numérique un large éventail de stratégies de gestion pour Manantali, en analysant l'influence des paramètres suivants : taux K des besoins de l'irrigation évalué par rapport aux besoins actuels ; objectif S_c de superficie des cultures de décrue ; seuil H_s de niveau nécessaire au 20 août pour faire le soutien de crue ;

Données

Ressource en eau et pertes en eau

La ressource en eau est évaluée sur la période 1970-2000 à partir des débits journaliers naturels de la Falémé à Gourbassy, du Bakoye à Oualia et du Bafing à Manantali (figure 9).

L'évaporation nette considérée (tableau III) est celle qui affecte la retenue (valeurs tirées de Gibb *et al.*, 1987) et le bief situé entre Bakel et Diama, lieu des différents prélèvements pour l'irrigation et l'AEP. Sur ce tronçon (456 km² de plan d'eau) les pertes moyennes sont évaluées à partir de taux d'évaporation donnés par Cogels *et al.* (1991) et de précipitations données par Albergel *et al.* (1994).

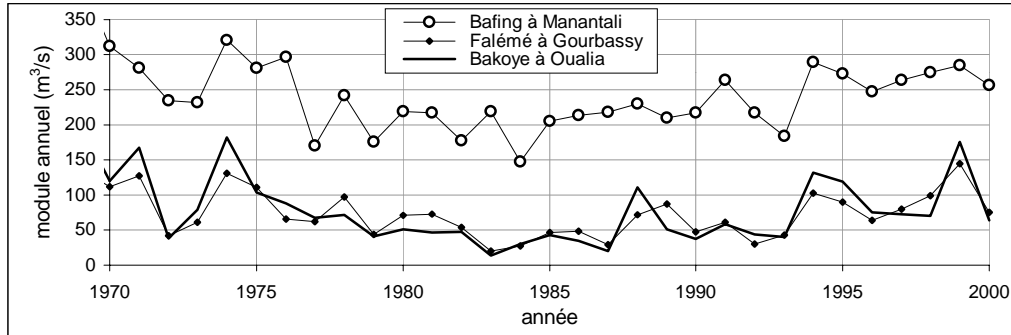


Figure 9. Module annuel naturel du Bafing, du Bakoye et de la Falémé, 1970-2000.

Tableau III. Pertes nettes moyennes par évaporation.

	janv	fev	mars	avr	mai	juin	juill	août	sept	oct	nov	dece
trajet Bakel-Diama (m ³ /s)	26.3	29.8	33.3	39.6	41.6	37.5	22.4	17.3	15.3	38.3	32.6	25.7
Plan d'eau de Manantali (mm/mois)	156	184	234	234	204	98	-92	-181	-60	48	96	99

Besoins concernés par le soutien d'étiage et le soutien de crue

Le soutien d'étiage est destiné aux prélèvements de l'AEP (valeur envisagée : 4 m³/s) et surtout de l'agriculture irriguée. L'irrigation concerne actuellement 125 000 hectares de périmètres majoritairement emblavés en riz (taux d'intensification : 55 %) et 9 800 hectares de cultures industrielles. Ses besoins nets en eau (tableau IV) sont donnés par Bonneau (2001).

Tableau IV. Besoins actuels en débit (m³/s) de l'agriculture irriguée.

janv	fev	mars	avr	mai	juin	juill	août	sept	oct	nov	dece
22	35	61	61	52	29	106	167	118	115	40	23

Le soutien de crue vise à produire une inondation suffisante du lit majeur du fleuve à l'aval de Bakel, pour l'équilibre écologique et la pratique des cultures de décrue. D'après les résultats du POGR, le tableau 5 donne les hydrogrammes minimaux de crue annuels associés à des superficies de cultures de décrue comprises entre 45 000 et 60 000 ha.

Tableau 5. Hydrogrammes minimaux nécessaires pour la pratique des cultures de décrue sur des superficies de 45 000 à 60 000 hectares.

superficie cultivée (ha)	22-août	26-août	28-août	02-sept	03-sept	19-sept	01-oct	
45000	0	1447	2027	1945	1774	1168	0	débit à Bakel (m ³ /s)
50000	0	1523	2144	2053	1874	1236	0	
55000	0	1611	2253	2157	1983	1304	0	
60000	0	1696	2372	2268	2078	1375	0	

Besoins en énergie hydroélectrique

L'objectif de l'OMVS est une production moyenne interannuelle de 800 GWh par an à Manantali.

Infrastructures et outils de gestion

La capacité maximale d'évacuation de Manantali se situe vers 7 000 m³/s, avec un débit turbinable maximal d'environ 500 m³/s, pour une puissance installée de 205 MW. Le plan d'eau est maintenu entre les cotes 187 et 210,50 m, correspondant respectivement à des superficies de 277 et 506 km² et à des volumes stockés de 3,6 et 12,8 km³.

La gestion du barrage en temps réel utilise le logiciel ProgeMan (IRD, 2002) qui calcule le débit à lâcher en fonction de la situation hydrologique et des consignes envisagées. Selon leur nature, ces dernières définissent chacune un débit minimal Q_{min} ou maximal Q_{max} à lâcher.

- Q_{min} pour : maintien de plan d'eau sous le niveau maximal de sécurité (A1) ; production d'énergie (A2) ; débit sanitaire réservé (A3) ; respect de débit objectif de soutien de crue (A4) ou d'étiage (A5) défini à Bakel ; maintien de revanche variable destinée au laminage des crues (A6).
- Q_{max} pour : maintien de plan d'eau au-dessus du niveau minimal de sécurité (B1) ; laminage de crue (B2) ; conservation de stock variable destiné au soutien d'étiage (B3).

La limite de débit relative à chaque consigne est calculée par bilan de volume (A1, A6, B1, B3), par modèle de propagation (Morel-Seytoux *et al.*, 1993) adapté au régime artificiel (A4, A5, B2) ou par calcul énergétique (A2). Le logiciel resserre la fourchette de débit physiquement évacuable du barrage en tenant compte successivement des limites Q_{min} ou Q_{max} définies par les consignes prises par ordre de priorité décroissante. La répartition du débit minimal de la fourchette dans les différents organes d'évacuation est ensuite calculée pour obtenir la meilleure production d'énergie possible.

Méthode

L'influence des paramètres K, Sc et Hs est testée en simulant la gestion du barrage au pas de temps journalier sur la période 1970-2000 avec le logiciel Simulsen (IRD, 2000). La gestion temps réel (avenir inconnu) est reproduite avec les consignes ci-dessous, classées par priorité décroissante :

A1 : Eviter la submersion des digues de la retenue : $H_{max} = 210,50$ m ;

B1 : Eviter l'affouillement de la partie basse du parement amont de l'ouvrage : $H_{min} = 187$ m ;

A3 : Lâcher un débit sanitaire réservé de 10 m³/s ;

B2 : Laminer le débit du Sénégal à Bakel, en dessous de $4\,500$ m³/s.

A6 : Conserver une revanche variable suffisante dans la retenue pour pouvoir laminier les crues du Sénégal à Bakel en dessous de $4\,500$ m³/s avec un taux de réussite de 49 années sur 50. Le limnigramme maximal correspondant, calculé avec Simulsen (Bader, 1992), est donné sur la figure 10.

A5 : Soutenir l'étiage pour l'agriculture irriguée et l'AEP. L'hydrogramme objectif défini à Bakel est la somme des pertes à compenser entre Bakel et Diama (tab.3), des besoins de l'AEP (4 m³/s) et des besoins actuels de l'agriculture irriguée (tab 4) multipliés par un facteur K (3 valeurs testées : 1 ; 2 ; 3).

B3 : Conserver un stock suffisant dans la retenue pour pouvoir effectuer le soutien d'étiage de la règle A5, avec un taux de réussite de 24 années sur 25. Le limnigramme minimal correspondant, calculé avec Simulsen (Bader, 1992), est donné sur la figure 11.

A2 : Produire la puissance maximale productible (205 MW) si le niveau de la retenue se situe au dessus de 204 m, et de 70 MW si le niveau se situe entre 197 et 204 m.

A4 : Soutenir la crue si le niveau de la retenue au 20 août est supérieur à un seuil Hs (18 valeurs testées entre 187 et 204 m), avec un hydrogramme objectif (tab. 5) associé à une superficie de cultures de décrue Sc (4 valeurs testées : 45 000 ; 50 000 ; 55 000 ; 60 000 ha).

Les valeurs testées pour les paramètres analysés (3 pour K, 4 pour Sc, 18 pour Hs) donnent 216 scénarios de gestion, tous simulés à partir d'une retenue pleine ($H = 208,05$ m) au 1er janvier 1970. Pour chacun sont obtenues les chroniques journalières suivantes : niveau de plan d'eau ; puissance produite ; débits lâchés par les différents organes du barrage ; débit à Kayes et à Bakel. Les débits de Bakel sont ensuite traduits en cote par une procédure adaptée au type d'étalonnage (méthode du gradient limnimétrique) de cette station. Enfin, les cotes obtenues à Bakel permettent d'évaluer les valeurs minimales probables S de superficie annuelle de cultures de décrue, en exploitant la relation établie par le POGR (tableau II) entre cette superficie et la valeur maximale annuelle de cote moyenne sur N jours consécutifs pour N valant 6, 10, 15, 20 et 25 jours.

Pour permettre une comparaison sans biais des superficies de culture de décrue du régime artificiel à celles du régime naturel de référence, ces dernières sont évaluées par la même chaîne de traitement, incluant comme seule consigne l'égalité stricte entre débit entrant et sortant de la retenue.

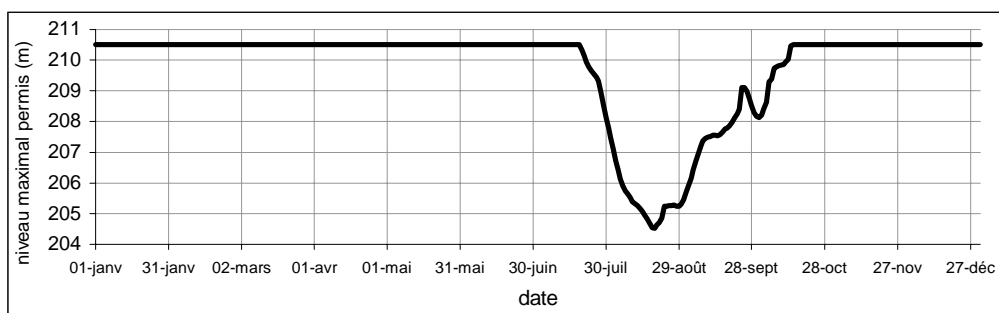


Figure 10. Niveau maximal à respecter dans la retenue pour permettre de laminer les crues du Sénégal à Bakel à $4\,500\text{ m}^3/\text{s}$, avec un taux de réussite de 49 années sur 50 (période 1950-2000).

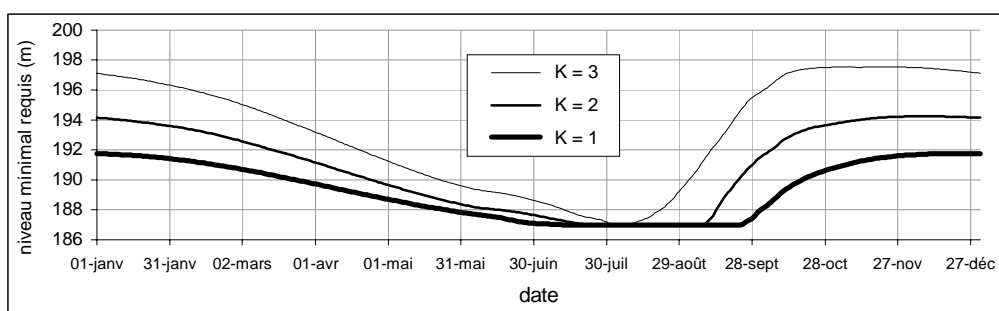


Figure 11. Niveau minimal à respecter dans la retenue pour permettre d'effectuer le soutien d'étiage désiré (pour des besoins en irrigation égaux à une, deux ou trois ($K = 1, 2$ ou 3) fois les besoins actuels), avec un taux de réussite de 24 années sur 25 (période 1950-2000).

Résultats

Soutien d'étiage

Aucun des scénarios testés ne présente de défaillance notable concernant le soutien de basses eaux. Ce résultat est dû à la consigne B3 de préservation de stock, prioritaire par rapport aux consignes A2 et A4 de fortes demandes en eau destinées à la production électrique et au soutien de crue.

Variabilité des superficies de cultures de décrue et de l'énergie produite

La figure 12 montre les fonctions de répartition de S (superficie cultivée en décrue) et W (énergie produite annuelle), relatives aux 8 scénarios de gestion extrêmes définis par les paramètres suivants : $K = 1$ ou 3 ; $Sc = 45\,000$ ou $60\,000$ ha ; Hs très haut (jamais de soutien de crue) ou très bas (soutien de crue déclenché tous les ans). Ces résultats extrêmes encadrent ceux de tous les scénarios testés.

L'énergie produite annuellement culmine vers $1\,300$ GWH pour tous les scénarios. Selon les années, elle varie sur une échelle de 1 à 2 en l'absence de soutien de crue, et sur une échelle de 1 à 3 (pour $Sc=45\,000$ ha) voire 1 à 4 (pour $Sc=60\,000$ ha) avec un soutien de crue déclenché chaque année.

Sans soutien de crue, les superficies cultivées en décrue sont très inférieures à celles du régime naturel et s'annulent une année sur dix. Par contre, avec les besoins actuels de l'irrigation ($K=1$), le soutien de crue systématique donne tous les ans une superficie de cultures de décrue au moins égale à l'objectif retenu, même pour $60\,000$ ha. Par rapport au régime naturel donnant des superficies S quasi-nulles ($2\,000$ ha) certaines années, ceci représente un progrès sensible pour les années faibles. Si les besoins de l'irrigation sont triplés, le stock à préserver pour cet usage contrarie l'efficacité du soutien de crue systématique qui, souvent incomplet, reste toutefois équivalent au régime naturel en année faible.

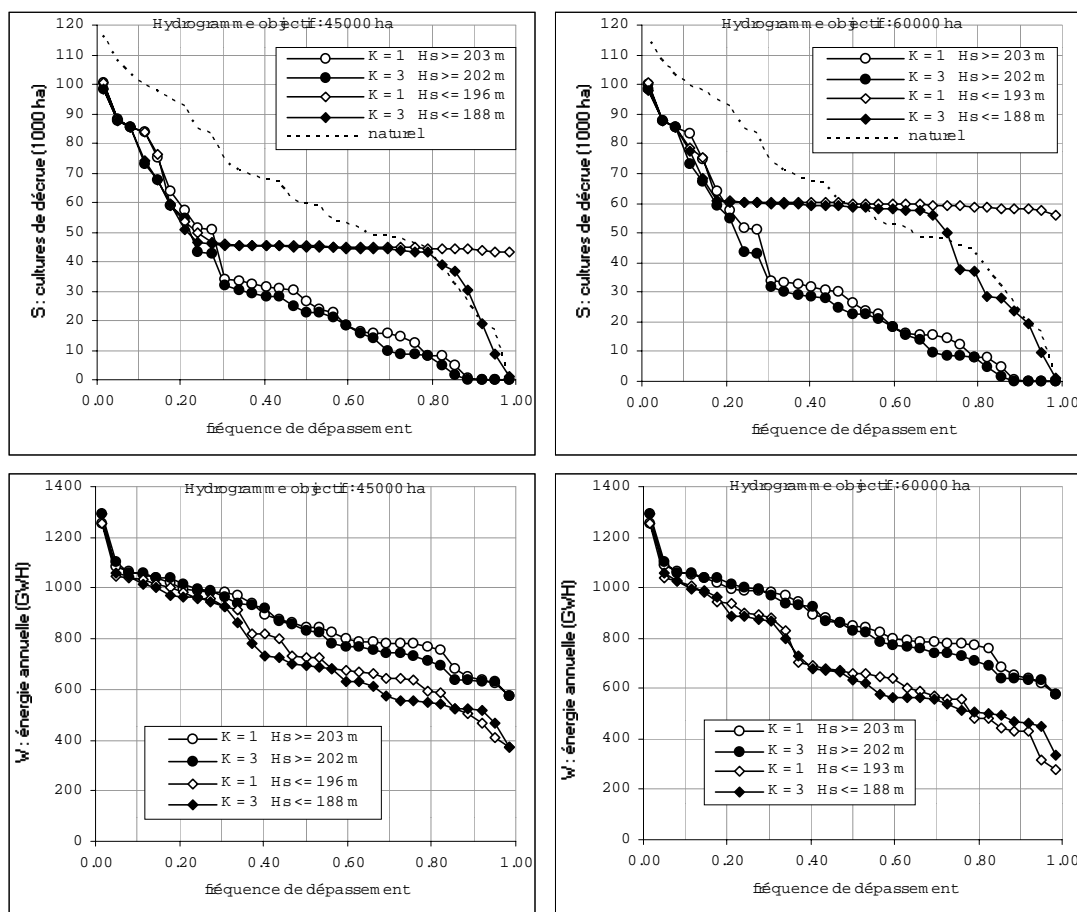


figure 12. Fonctions de répartition de la superficie S de cultures de décrue et de l'énergie W produite par année, pour les scénarios de gestion extrêmes envisagés

Moyennes des superficies de cultures de décrue et de l'énergie produite

Pour les différents besoins envisagés pour l'irrigation (K = 1 à 3) et pour des objectifs de 45 000 ou 60 000 ha de cultures de décrue, la figure 13 montre qu'une augmentation du seuil Hs, rendant le soutien de crue moins fréquent, entraîne toujours une augmentation de l'énergie moyenne interannuelle produite et une diminution de la superficie moyenne interannuelle des cultures de décrue.

Avec les besoins actuels de l'agriculture irriguée, un soutien de crue systématique visant 45 000 ha de cultures de décrue donne les moyennes interannuelles suivantes : 52 000 ha de cultures de décrue (63 000 ha en régime naturel) ; 768 GWh d'énergie annuelle produite. Sans soutien de crue, les résultats sont inversés : 33 000 ha et 869 GWh respectivement.

La figure 14 qui concerne l'ensemble des scénarios testés, montre une relation très nette entre la moyenne interannuelle de superficie S de culture de décrue et celle de production annuelle d'énergie W, pour chaque valeur de K testée. La relation globale suivante donne W (en GWh) en fonction de S (en 1 000 ha) et de K, avec une erreur type de 3,0 GWh :

$$W = (-0,364 K^2 + 0,687 K - 5,705) S + (2,04 K^2 + 3,25 K + 1042,39) \quad (R^2 = 0,9965)$$

Ainsi, l'augmentation d'un hectare de la superficie moyenne S de culture de décrue obtenue par soutien de crue, abaisse la puissance moyenne W produite au barrage de 614 watts dans le cas des besoins actuels de l'irrigation (resp. 660 watts ou 789 watts pour des besoins doublés ou triplés).

Si l'on considère une superficie moyenne S de culture de décrue de 35 000 ha et une superficie actuelle effective de cultures irriguées annuelles de 78 550 hectares (= 0,55 * 125 000 + 9 800), la relation W(S,K) montre que le doublement ou le triplement de cette superficie irriguée (K = 2 ou 3 resp.) entraîne par hectare une perte de puissance constante produite de 7 watts ou 23 watts respectivement. La perte d'énergie produite à Manantali entraînée par l'accroissement d'un hectare des superficies cultivées est donc incomparablement plus faible pour les cultures irriguées que pour les cultures de décrue.

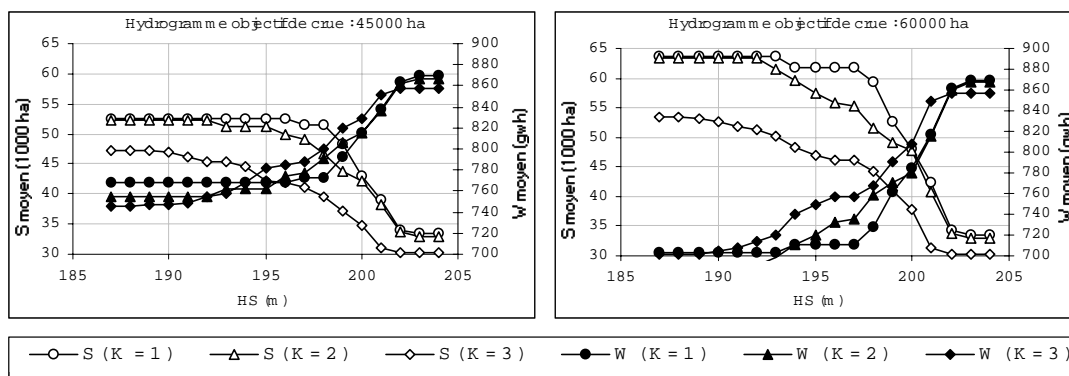


Figure 13. Influence du seuil H_s de déclenchement du soutien de crue sur les moyennes interannuelles de la superficie S cultivée en décrue et de l'énergie W produite par année.

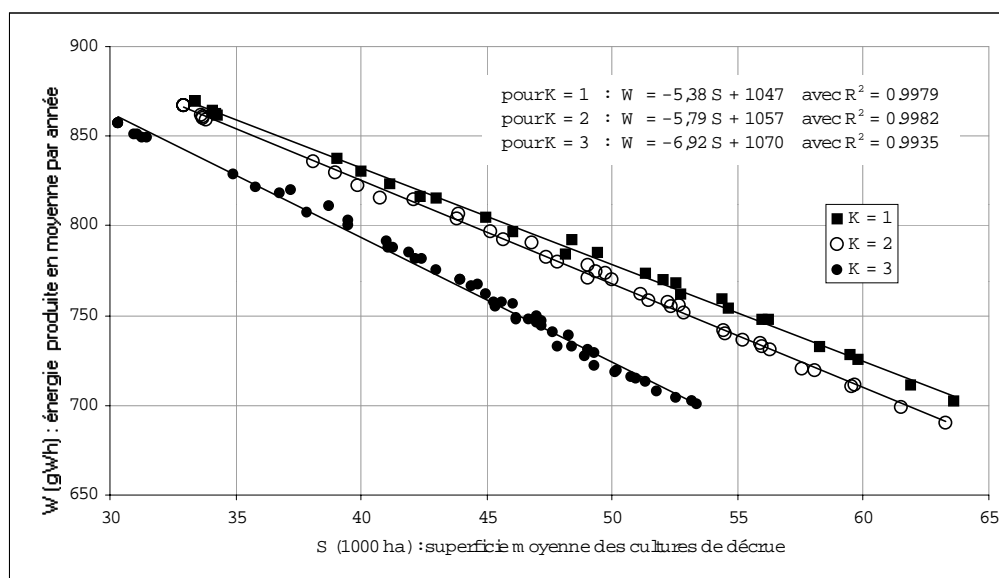


Figure 14. Relation entre la moyenne interannuelle de W (énergie produite par année) et celle de S (superficie annuelle de cultures de décrue), en fonction de K (taux d'augmentation des besoins en eau de l'irrigation par rapport aux besoins actuels) pour l'ensemble des scénarios de gestion testés.

Conclusion

Le POGR a permis de définir une forme optimale d'hydrogramme de crue en fonction de la superficie des cultures de décrue pratiquées dans la vallée du Sénégal, et d'utiliser ce résultat pour tester un large éventail de scénarios de gestion par simulation numérique. Sur la base des ressources en eau observées durant la période 1970-2000, une relation est établie entre les résultats suivants : moyenne de production énergétique annuelle ; moyenne de superficie de cultures de décrue ; superficie cultivable sous irrigation. Les cultures traditionnelles de décrue qui nécessitent très peu d'investissement, pénalisent la production d'énergie si l'on veut les maintenir sur une superficie importante. Au contraire les cultures irriguées, coûteuses en investissement et en maintenance, peuvent encore voir leurs besoins augmenter dans une large gamme à partir de la situation actuelle sans entraîner de baisse importante de la production d'énergie. Ces résultats qui décrivent l'étendue des possibilités offertes par l'ouvrage à partir de la ressource disponible, peuvent être ensuite interprétés à l'aide de critères économiques et sociaux pour faciliter l'adoption d'une stratégie de gestion par les pays membres de l'OMVS.

Le soutien de crue actuellement préconisé et tel qu'il a été pris en compte dans cette étude, fonctionne selon un mode "tout ou rien". Si le niveau dans la retenue dépasse un seuil prédéfini au 20 août, alors on vise à réaliser un hydrogramme également prédéfini. Dans le cas contraire, le soutien de crue est abandonné pour

l'année en cours. Le choix d'un hydrogramme objectif variable en fonction du niveau observé au 20 août, et tenant compte éventuellement de certains indices de prévisions saisonnières de pluie, pourrait constituer une amélioration notable. Des recherches sont actuellement menées à l'IRD sur ce sujet.

Il faut noter enfin que les méthodes d'analyse développées pour définir la forme optimale de l'hydrogramme de crue, ainsi que les logiciels de simulation ou de gestion de barrage mis au point dans le cadre du POGR, sont transposables sur d'autres bassins présentant des problématiques voisines.

Références bibliographiques

Albergel J., Bader J.-C., Séguis L., 1994. Etude hydrologique du marigot de Ngalenka dans la basse vallée du Sénégal. GIE ORSTOM/EDF, Dakar, Sénégal.

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

Bonneau M., 2001) Programme d'optimisation de la gestion des réservoirs. Besoins en eau de l'agriculture irriguée et de l'agriculture de décrue dans la vallée du fleuve Sénégal. IRD, OMVS, Dakar, Sénégal.

Cogels, F.X., Evora, N., Gac J.-Y., 1991 L'évaporation du lac de Guiers de 1976 à 1989 : bilan et essai d'interprétation. ORSTOM, Dakar, Sénégal.

Gibb, S. A. and partners, Electricité de France & Euroconsult, 1987. Etude de la gestion des ouvrages communs de l'OMVS. OMVS, Dakar, Sénégal.

IRD, 2000. Programme d'optimisation de la gestion des réservoirs. Simulsen : logiciel de simulation de gestion du barrage de Manantali au pas de temps journalier. IRD, OMVS, Dakar, Sénégal.

IRD, 2000. Programme d'optimisation de la gestion des réservoirs. Progeman : logiciel d'aide à la gestion en temps réel du barrage de Manantali. IRD, OMVS, Dakar, Sénégal.

Lamagat J.P. *et al.*, 2001. Programme d'Optimisation de Gestion des Réservoirs – Phase III – Crue artificielle et cultures de décrue – Synthèse finale.

Morel-Seytoux H., Fahmy H., Lamagat J.P., 1993. A composite hydraulic and statistical flow-routing method. Water Resources Research, 29 (2) : 413-418.