

Gestion du barrage de Manantali sur le fleuve Sénégal: analyse quantitative d'un conflit d'objectifs

JEAN-CLAUDE BADER

IRD, BP 64501, 34394 Montpellier Cedex 5, France
bader@mpl.ird.fr

JEAN-PIERRE LAMAGAT & NOËL GUIGUEN

IRD, BP 1386, Dakar, Sénégal
lamagat@dakar.ird.sn; guiguen@dakar.ird.sn

Résumé Le barrage de Manantali implanté sur le fleuve Sénégal en Afrique de l'Ouest, est destiné à satisfaire différents objectifs entre lesquels apparaît une forte concurrence (énergie et soutien d'étiage d'une part; soutien de crue d'autre part). En quantifiant les résultats pouvant être simultanément obtenus pour chacun de ces objectifs, l'étude explore une vaste gamme de stratégies de gestion compatibles avec la ressource en eau disponible. L'analyse consiste à simuler numériquement la gestion en temps réel du barrage sur la base des ressources en eau observées sur la période 1970–2000. Le soutien d'étiage est envisagé pour satisfaire de façon quasiment garantie les besoins de l'agriculture irriguée, considérés comme égaux, doublés ou triplés par rapport aux besoins actuels. Le soutien de crue est envisagé pour différents objectifs de superficies de cultures de décrue traduits en hydrogrammes de crue, et pour différents seuils de stocks conditionnant sa réalisation. Les résultats obtenus pour les 216 scénarios de gestion simulés montrent une relation linéaire remarquable entre l'énergie pouvant être produite en moyenne par année au barrage et la valeur moyenne des superficies pouvant être cultivées en décrue. Ainsi, prenant l'absence de soutien de crue comme scénario de base, il apparaît que la perte de production d'énergie entraînée en moyenne par chaque hectare supplémentaire rendu cultivable en décrue peut être estimée en terme de puissance constante à 614 W dans le cas des besoins actuels de l'irrigation, et à 789 W si ces besoins sont triplés. Tout en satisfaisant les besoins actuels de l'agriculture irriguée, il est possible d'envisager un soutien de crue garantissant chaque année une superficie cultivable en décrue d'au moins 45 000 ha et de 52 000 ha en moyenne, avec une production d'énergie annuelle d'au moins 372 GWh et de 768 GWh en moyenne.

Mots clés Afrique; fleuve Sénégal; gestion des réservoirs, hydroélectricité; soutien d'étiage; soutien de crue; conflit d'objectifs; simulation numérique; irrigation; cultures de décrue

Management of the Manantali Dam on the Senegal River: quantitative analysis of a conflict of objectives

Abstract Located on the Senegal River in West Africa, the Manantali Dam has been given different rival objectives: energy production and low-flow augmentation on the one hand; flood support on the other. This study examines a large range of management strategies and quantifies the results for each objective, depending on the available water resources. The operational management of the dam is numerically simulated over the 1970–2000 period. The low flow augmentation is considered to satisfy the needs of irrigated agriculture (supposed equal, doubled or tripled compared with the actual needs) with a high guaranty. The flood support is considered for different objectives of traditional flood-plain farming areas (translated into flow hydrographs) and for different thresholds conditioning water release. The results obtained for 216 simulated management scenarios show a notable linear relationship between the mean annual energy production and the mean annual area of traditional cropping. In comparison with a base scenario with no flood support, the increase of 1 ha of mean traditional cultivation area resulting from flood support involves a loss of mean electricity production, which amounts to 614 W in the present situation and

would increase to 789 W if the irrigation needs trebled. The high capacity of the Manantali Reservoir makes it possible to reach the following objectives: meeting the present irrigation needs; annual flood support allowing to 52 000 ha of mean floodplain cultivation area (and a minimum of 45 000 ha); mean annual energy production of 768 GWh (and a minimum of 372 GWh).

Key words Africa; Senegal River; reservoir operation; hydroelectricity; low flow augmentation; flood support; objectives conflict; numerical simulation; irrigation; floodplain farming

CONTEXTE

Le Sénégal (Fig. 1) est un grand fleuve d'Afrique de l'Ouest, dont le régime naturel à forte variabilité interannuelle est caractérisé par une période de crue s'étalant de juillet à octobre (Rochette, 1974 ; Rodier, 1964). A la décrue succède un tarissement progressif pouvant aboutir certaines années, à un quasi arrêt de l'écoulement vers les mois de mai ou juin. La majeure partie de l'écoulement du Sénégal provient de son bassin amont drainé par le Bafing (entre 40 et 60% des apports), le Bakoye et la Falémé. A partir de Bakel situé à 794 km de l'embouchure, le fleuve, qui ne reçoit plus que des apports sporadiques, s'écoule dans une vallée très plate (pente moyenne de ligne d'eau en étiage: 0.001%), où la crue unimodale peut inonder le lit majeur sur plusieurs centaines de milliers d'hectares. Observé depuis un siècle à plusieurs stations, le Sénégal montre une baisse notable de son hydraulité naturelle depuis le début des années 1970 (Fig. 2), comme plusieurs autres cours d'eau d'Afrique de l'Ouest. Une légère reprise se manifeste toutefois vers la fin des années 1990. Ce fleuve est équipé depuis 1986 et 1987 des deux grands barrages de Diama et de Manantali, qui sont gérés par l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS), organisme inter-état regroupant le Mali, la Mauritanie et le Sénégal.

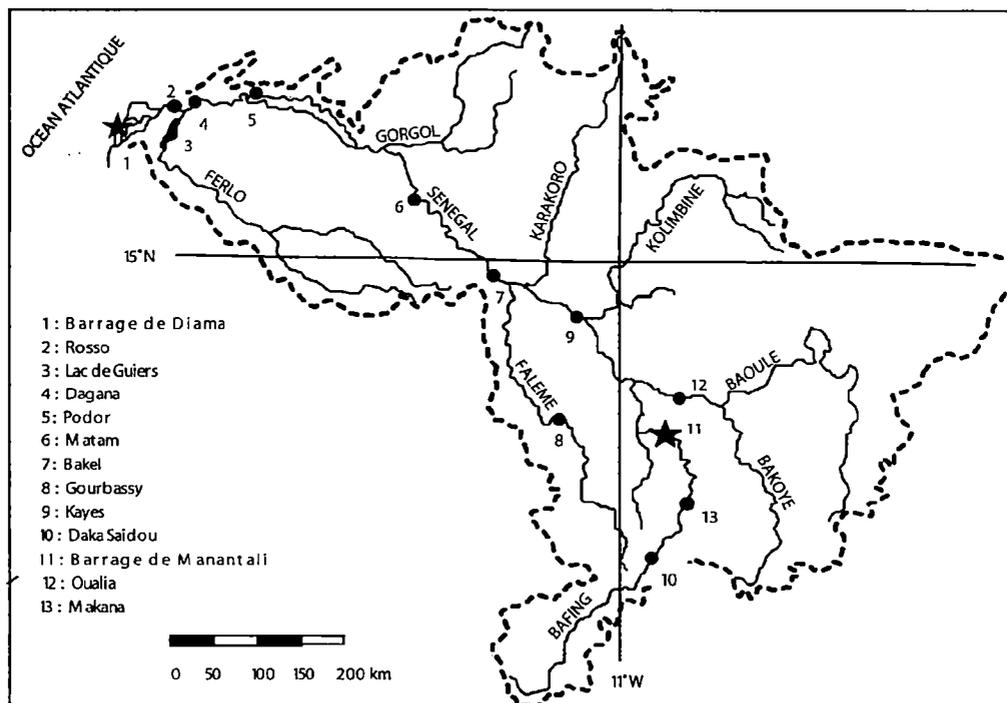


Fig. 1 Carte du bassin du Sénégal.

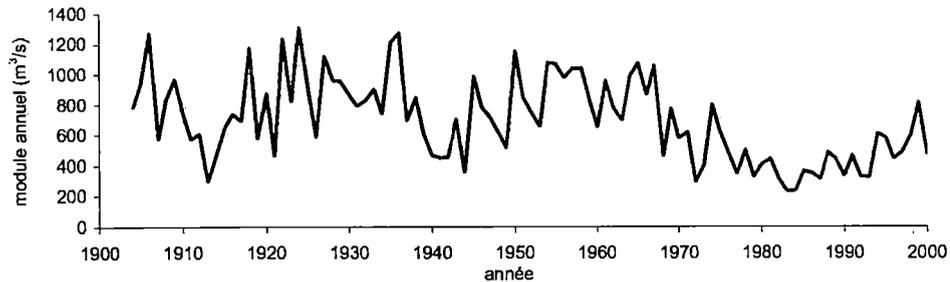


Fig. 2 Module annuel naturel du Sénégal à Bakel, 1904–2000.

L'objectif du barrage de Diama, situé près de l'embouchure, est d'empêcher la remontée du front salé pendant l'étiage. En rehaussant, hors période de crue, le plan d'eau amont à plus de 2 m au dessus du niveau de la mer, il favorise en outre l'irrigation gravitaire des cultures pratiquées dans le delta.

Le barrage de Manantali, qui retient un volume d'eau de 12 km³, est destiné à produire de l'énergie (205 MW de puissance installée, début de production en 2002) et à réguler les débits (soutien d'étiage pour l'agriculture irriguée et la navigation, laminage des fortes crues pour limiter leurs effets catastrophiques, soutien des faibles crues destiné à garantir une inondation suffisante du lit majeur pour la pratique des cultures de décrue et le maintien de l'équilibre écologique). Certains de ces objectifs concernent différemment les trois états riverains. Ainsi la navigabilité du fleuve jusqu'à Kayes intéresse surtout le Mali, pays enclavé, alors que les cultures de décrue et les cultures irriguées sont essentiellement pratiquées au Sénégal et en Mauritanie, à l'aval de Bakel.

Le soutien de crue, très concurrentiel avec l'ensemble des autres objectifs assignés à l'ouvrage, consiste à réaliser à Bakel un hydrogramme objectif prédéfini. Selon l'amplitude et la date de ce dernier, et selon le débit des affluents non contrôlés (Bakoye, Falémé), les débits à lâcher de Manantali peuvent dépasser largement la capacité des turbines et représenter un déstockage important, ce qui pénalise à la fois la production d'énergie et la capacité de soutien d'étiage de l'ouvrage. Dans le cadre du POGR (Programme d'Optimisation de la Gestion des Réservoirs) mené pour le compte de l'OMVS sur financement de la Coopération Française, l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) a cherché à minimiser le coût en eau du soutien de crue, en jouant à la fois sur la forme de l'hydrogramme objectif, sur sa date et sur les conditions de sa réalisation:

- Une relation assez nette a pu être établie entre la superficie annuelle des cultures de décrue pratiquées entre Matam et Dagana et certaines caractéristiques de l'hydrogramme de crue observé à Bakel (IRD, 2001a). On peut ainsi définir l'hydrogramme de crue minimal permettant de pratiquer en moyenne les cultures de décrue sur une superficie donnée.
- Pour la date optimale du soutien de crue, une précédente étude avait montré l'intérêt que pourrait représenter une prévision des débits à l'horizon 10 jours sur la Falémé à Goubassy et sur le Bakoye à Oualia (Bader, 1997). Une telle prévision permettrait de caler le palier maximal de l'hydrogramme objectif sur une pointe des affluents non contrôlés, en minimisant ainsi le volume lâché de Manantali. Malheureusement, faute de données suffisantes, il n'a pas été possible de caler un modèle hydro-pluviométrique permettant de faire cette prévision. La

solution retenue consiste donc à effectuer le soutien à une date fixe qui minimise, en moyenne, le volume lâché non turbinable. Ce calage moyen optimal situe le début de palier maximal (durée: 6 jours) de l'hydrogramme objectif à la date du 28 août (IRD, 1999).

- La règle actuellement préconisée consiste à n'effectuer le soutien de crue que si le plan d'eau de Manantali se situe, au 20 août au dessus d'un seuil limite, H_s . Dans le cas contraire, le soutien est abandonné pour l'année en cours, afin de permettre au stock de se reconstituer pour le bénéfice ultérieur de l'ensemble des usages. La production moyenne d'énergie et la fréquence des crues trop faibles (non soutenues ou soutenues de façon incomplète, et inférieures à l'objectif) augmentent avec le seuil H_s (IRD, 2001b).

Le problème de la stratégie de gestion à adopter pour Manantali reste posé. Les états de l'OMVS doivent se mettre d'accord sur un compromis d'objectifs compatible avec la ressource disponible.

OBJECTIF

Cette étude vise à évaluer la gamme des possibilités offertes par le barrage de Manantali, compte tenu des ressources en eau estimées à partir des observations de la période 1970–2000, et à la lumière des connaissances acquises par le POGR. Il s'agit de quantifier les résultats pouvant être attendus en matière de production d'énergie, de débit garanti en basses eaux et de superficie cultivée en décrue en fonction des options retenues pour la gestion de Manantali. L'influence des trois paramètres suivants est analysée:

- l'hydrogramme objectif de crue, pour des superficies associées de cultures de décrue comprises entre 45 000 et 60 000 ha;
- le seuil H_s de cote nécessaire dans la retenue au 20 août pour déclencher le soutien de crue;
- l'hydrogramme à soutenir en basses eaux, incluant les besoins de l'agriculture irriguée; ces derniers sont envisagés égaux, doublés ou triplés par rapport aux besoins actuels.

DONNÉES

Ressource

La ressource en eau est estimée au pas de temps journalier à partir du débit naturel de la Falémé à Gourbassy (observé), du Bakoye à Oualia (observé) et du Bafing à Manantali (observé jusque début 1987 et reconstitué ensuite à partir des données recueillies à l'amont: Makana et Daka-Saidou). La Fig. 3 montre l'évolution du module annuel à ces stations entre 1970 et 2000.

Besoins concernés par le soutien d'étiage

Le soutien d'étiage est destiné à la fois au prélèvement d'eau pour l'irrigation et l'alimentation humaine, et au maintien d'un tirant d'eau suffisant au dessus des seuils

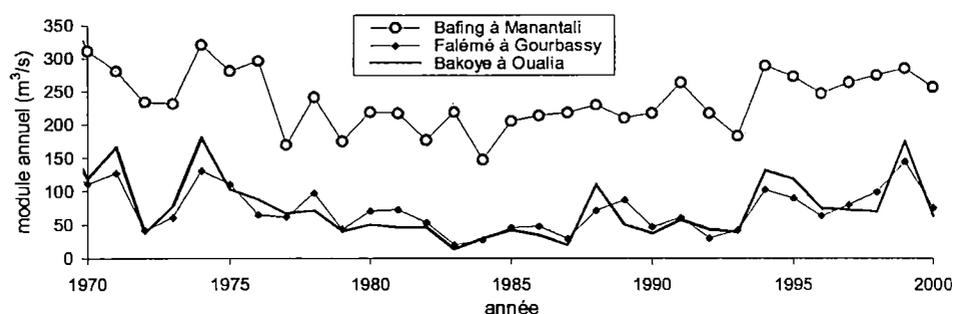


Fig. 3 Modules annuels naturels du Bafing, du Bakoye et de la Falémé, 1970–2000.

Tableau 1 Besoins actuels en débit ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) de l'agriculture irriguée.

| jan. | fév. | mars | avril | mai | juin | juill. | août | sep. | oct. | nov. | déc. |
|------|------|------|-------|-----|------|--------|------|------|------|------|------|
| 22 | 35 | 61 | 61 | 52 | 29 | 106 | 167 | 118 | 115 | 40 | 23 |

pour rendre le fleuve navigable. Ce dernier usage, avec des besoins encore assez mal connus, n'est pas pris en compte dans cette étude.

Actuellement dans la vallée du fleuve, l'irrigation concerne d'une part 9800 ha de cultures industrielles (cane à sucre, tomates), et d'autre part 125 000 ha de périmètres exploités avec un taux d'intensification très faible (55% au lieu des 200% théoriques d'une double culture généralisée) et majoritairement emblavés en riz. Les besoins nets en eau de l'ensemble de ce secteur d'activité (Tableau 1) sont donnés par Bonneau (2001). Les valeurs tiennent compte des assolements, de l'intensité culturale, des superficies réellement exploitées, des besoins théoriques en eau par espèce et des efficacités de distribution, incluant le retour dans le réseau de drainage et donc dans le fleuve.

L'ordre de grandeur des prélèvements destinés à l'alimentation humaine est de $4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Besoins concernés par le soutien de crue

Le soutien de crue est destiné à garantir une inondation suffisante du lit majeur du fleuve à l'aval de Bakel, dans le but de maintenir un certain équilibre écologique (recharge de nappe, pâturages, frayères) et de permettre la pratique de l'agriculture traditionnelle extensive de décrue. Le POGR a mis en évidence une relation très nette (IRD, 2001a) entre la superficie cultivée en décrue, comprise entre 7000 et 137 000 ha selon les années 1946–2000, et la moyenne des N plus fortes cotes observées dans l'année à la station de Bakel, pour N variant entre 6 et 60 jours. Le Tableau 2 donne cette relation pour des superficies comprises entre 45 000 et 70 000 ha. Les crues observées à Bakel étant le plus souvent unimodales, cette relation a permis de définir des limnigrammes de crue minimaux pour différentes superficies cultivées, en respectant les critères suivants:

- Vu les crues observées, le limnigramme doit être à peu près trapézoïdal avec une montée rapide, un palier maximal de 6 jours et enfin une décroissance lente du débit.

Tableau 2 Relation entre limnigramme de crue et superficie moyenne des cultures de décrue.

| Superficie cultivée, S (ha) | Moyenne des N plus fortes cotes de l'année à l'échelle de Bakel (cm): | | | | | |
|-------------------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|
| 45 000 | 732 | 710 | 689 | 668 | 648 | 629 |
| 50 000 | 757 | 734 | 712 | 690 | 669 | 649 |
| 55 000 | 780 | 758 | 734 | 712 | 690 | 669 |
| 60 000 | 804 | 781 | 757 | 733 | 711 | 690 |
| 65 000 | 827 | 804 | 779 | 755 | 732 | 711 |
| 70 000 | 850 | 828 | 802 | 778 | 754 | 733 |
| N | 6 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |

N : nombre de jours.

Tableau 3 Hydrogrammes minimaux nécessaires pour la pratique des cultures de décrue sur des superficies de 45 000 à 60 000 ha.

| Superficie cultivée, S (ha) | 22 août | 26 août | 28 août | 02 sep. | 03 sep. | 19 sep. | 01 oct. | |
|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------------------------------|
| 45 000 | 0 | 1447 | 2027 | 1945 | 1774 | 1168 | 0 | Débit à Bakel ($m^3 s^{-1}$) |
| 50 000 | 0 | 1523 | 2144 | 2053 | 1874 | 1236 | 0 | |
| 55 000 | 0 | 1611 | 2253 | 2157 | 1983 | 1304 | 0 | |
| 60 000 | 0 | 1696 | 2372 | 2268 | 2078 | 1375 | 0 | |

- Une submersion de 25 jours étant suffisante pour assurer le bon développement des cultures jusqu'à la récolte, il suffit de respecter la relation entre superficie cultivée et cote moyenne sur N jours à Bakel pour $N \leq 25$ jours.

La traduction en débit des limnigrammes obtenus donne les hydrogrammes minimaux nécessaires pour des superficies cultivées comprises entre 45 000 et 60 000 ha (Tableau 3).

Besoins en énergie hydroélectrique

La capacité maximale de production d'énergie des pays membres de l'OMVS, y compris Manantali, reste largement inférieure à leurs besoins potentiels. Dans ce contexte, il vaut mieux maximiser la production moyenne d'énergie du barrage, plutôt qu'utiliser son usine pour répondre à des pointes de demande de puissance. La production d'un kilowatt-heure (kWh) nécessite en effet un volume de gazole relativement constant, puisé dans un stock déjà payé (à un prix certes variable en dollar, mais sur lequel on n'a aucune prise). Au contraire, le volume d'eau nécessaire pour produire 1 kWh est très variable selon le niveau du plan d'eau amont de Manantali: 12.2 m³ à la cote 187 m, et 7.2 m³ à la cote 208 m. L'objectif principal affiché par l'OMVS en matière de production d'énergie à Manantali s'exprime donc sous forme d'énergie produite en moyenne par année. Il s'élève à 800 GWh.

Pertes

Sur la retenue de Manantali, les pertes (Tableau 4) sont estimées à partir des valeurs d'évaporation nette moyenne mensuelle données par Gibb *et al.* (1987).

Tableau 4 Pertes nettes par évaporation.

| | jan. | fév. | mars | avril | mai | juin | juill. | août | sep. | oct. | nov. | déc. |
|--|------|------|------|-------|------|------|--------|------|------|------|------|------|
| Trajet Bakel– Diama ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) | 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 ⁻¹) | 156 | 184 | 234 | 234 | 204 | 98 | -92 | -181 | -60 | 48 | 96 | 99 |

La plupart des prélèvements pour l'irrigation étant effectués à l'aval de Bakel, l'hydrogramme objectif de soutien de basses eaux est défini à cette station. En plus des débits prélevés, cet hydrogramme doit inclure les pertes à compenser sur le trajet Bakel–Diama, sachant que le maintien d'un niveau amont élevé pendant l'étiage est un des principaux objectifs de gestion de ce barrage. Les valeurs d'évaporation nette moyenne mensuelle entre Bakel et Diama sont estimées à partir des taux moyens d'évaporation calculés par Cogels *et al.* (1991) pour le lac de Guiers (1976–1989), et de la pluie moyenne à Podor (1986–1992) donnée par Albergel *et al.* (1994). La superficie de plan d'eau étant estimée, pour un débit de $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, à 183 km^2 entre Bakel et Rosso et 273 km^2 entre Rosso et Diama, on obtient les débits indiqués dans le Tableau 4 pour la compensation des pertes nettes par évaporation à l'aval de Bakel.

Infrastructures et outils de gestion

L'implantation définitive comporte 5 turbines pouvant chacune développer entre 9 et 41 MW avec un rendement variant entre 83 et 94% selon la chute et le débit. Pour des raisons de sécurité liées aux caractéristiques de l'ouvrage, le niveau du plan d'eau amont doit être maintenu entre les cotes 187 et 210.50 m, correspondant respectivement à des surfaces d'eau libre de 277 et 506 km^2 , et à des volumes stockés de 3.6 et 12.8 km^3 . Les huit vannes de fond (seuil à 155.03 m) et les sept vannes de surface (seuil à 202 m, ouverture obligatoire à partir de la cote 208.05 m) permettent de lâcher un débit de l'ordre de $7000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ à la cote 210.50 m. Le débit turbinable maximal est de l'ordre de $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Les débits de la Falémé et du Bakoye sont connus en temps réel par transmission radio. Ces informations permettent de calculer les débits à lâcher pour respecter les débits objectifs (soutien de crue, soutien d'étiage, laminage des crues) définis à Bakel, à l'aide d'un modèle de propagation basé sur la méthode de Morel-Seytoux *et al.* (1993), adaptée pour le cas d'un régime artificiel. Le réglage des différents organes d'évacuation du barrage est calculé en temps réel en fonction de la situation hydrologique, à l'aide du logiciel Progeman (IRD, 2002) qui tient compte des consignes associées aux objectifs de gestion retenus. Ces consignes définissent chacune un débit minimal Q_{\min} ou maximal Q_{\max} à lâcher du barrage:

- Consignes définissant un Q_{\min} : respect du niveau maximal de sécurité dans la retenue (A1); production d'énergie (A2); débit sanitaire réservé à la sortie du barrage (A3); respect de débit objectif de soutien de crue (A4) ou de soutien d'étiage (A5) défini à Bakel; respect d'une revanche suffisante dans la retenue pour permettre le laminage des crues (A6);

- Consignes définissant un Q_{\max} : respect du niveau minimal de sécurité dans la retenue (B1); laminage de crue (B2); conservation d'un stock suffisant pour permettre le soutien d'étiage (B3).

Partant de la fourchette de débit physiquement évacuable du barrage, le logiciel resserre celle-ci en tenant compte successivement des limites Q_{\min} ou Q_{\max} définies par les consignes considérées 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

Pour tester l'influence des trois paramètres qui nous intéressent (hydrogramme objectif de crue; seuil H_s de déclenchement du soutien de crue; hydrogramme objectif d'étiage), la gestion du barrage est simulée au pas de temps journalier sur la période 1970–2000 à l'aide du logiciel Simulsen (IRD, 2000). Les principes de gestion appliqués en temps réel sont reproduits par ce logiciel qui fonctionne en mode "avenir inconnu". Les consignes simulées sont les suivantes:

- 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 $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.
- B2: Laminer le débit du Sénégal à Bakel, en dessous de $4500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.
- A6: Conserver une revanche suffisante dans la retenue, pour pouvoir laminer les crues du Sénégal à Bakel en dessous de $4500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ avec un taux de réussite de 49 années sur 50, en référence à la période 1950–2000. Le limnigramme de cote maximale à respecter dans le lac, calculé grâce à une procédure particulière de Simulsen (Bader, 1992) est représenté sur la Fig. 4.
- A5: Soutenir l'étiage pour les besoins de l'agriculture irriguée et de l'alimentation humaine. L'hydrogramme objectif défini à Bakel est la somme des pertes à compenser entre Bakel et Diama (Tableau 4), des besoins de l'AEP ($4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) et des besoins de l'agriculture irriguée considérés comme égaux ($K = 1$), doubles ($K = 2$) ou triples ($K = 3$) par rapport aux besoins actuels (Tableau 1).
- B3: Conserver un stock suffisant dans la retenue pour pouvoir effectuer le soutien d'étiage mentionné dans la règle A5, avec un taux de réussite de 24 années sur 25 en référence à la période 1950–2000. Le limnigramme de cote minimale à respecter dans le lac, calculé avec Simulsen (Bader, 1992) est représenté sur la Fig. 5.
- 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 au seuil H_s . L'hydrogramme objectif correspond au minimum nécessaire pour permettre en moyenne la pratique des cultures de décrue sur une superficie de 45 000, 50 000, 55 000 ou 60 000 ha (Tableau 3). Dix huit valeurs différentes de H_s , espacées de 1 m entre 187 et 204 m, sont testées dans cette étude.

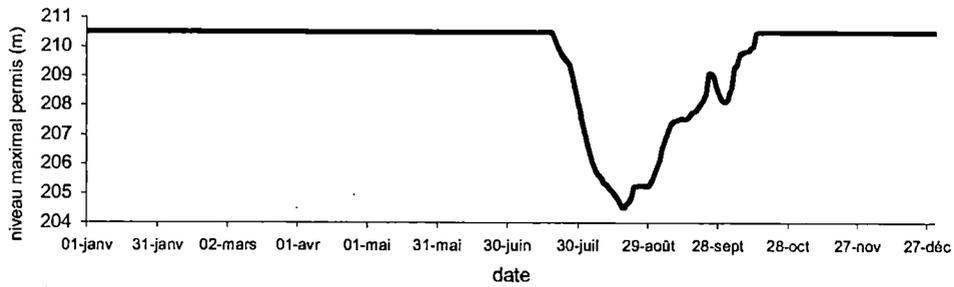


Fig. 4 Niveau maximal à respecter dans la retenue pour permettre de laminier les crues du Sénégal à Bakel à $4500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, avec un taux de réussite de 49 années sur 50.

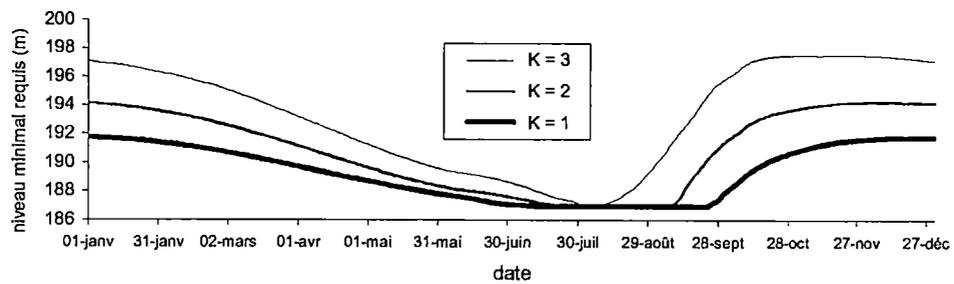


Fig. 5 Niveau minimal à respecter dans la retenue pour permettre d'effectuer le soutien d'étiage désiré (pour des besoins en irrigation égaux à une, deux ou trois ($K = 1, 2$ ou 3) fois les besoins actuels), avec un taux de réussite de 24 années sur 25.

La combinaison des trois objectifs de soutien d'étiage ($K = 1$ à 3), des quatre objectifs de soutien de crue (45 000–60 000 ha) et des 18 valeurs testées (de 187 à 204 m) pour le seuil H_s de déclenchement du soutien de crue, donne 216 scénarios de gestion différents. Pour chacun d'eux, simulé en supposant une retenue pleine ($H = 208.05$ m) au 1 janvier 1970, Simulsen donne les chroniques journalières obtenues pour le niveau de la retenue, la puissance produite, le débit lâché par les différents organes du barrage et le débit passant aux stations situées à l'aval.

Les débits Q obtenus à Bakel sont traduits en cote H par un calcul itératif rendu indispensable par le caractère non bi-univoque de l'étalement de cette station, établi suivant la méthode du gradient limnimétrique: $Q = Q_0(H) \times (1 + K(H) \times \text{grad}(H))^{0.5}$.

Les superficies de cultures de décrue associées aux limnigrammes de crue obtenus à Bakel, sont calculées année par année de la façon suivante:

- Pour chaque jour j de l'année:
 - (a) calcul de la valeur maximale $Hn(j)$ de cote moyenne sur n jours consécutifs englobant les jours j à $j + 5$, pour $n = 6, 10, 15, 20$ et 25 jours;
 - (b) calcul des superficies cultivées moyennes $Sn(j)$ associées aux valeurs maximales $Hn(j)$ de cotes moyennes pour $n = 6, 10, 15, 20$ et 25 jours, à partir du Tableau 2;
 - (c) évaluation de la superficie cultivée élémentaire $S(j)$ par: $S(j) = \min[S6(j), S10(j), S15(j), S20(j), S25(j)]$.
- Calcul de la superficie cultivée S de l'année par : $S = \max[S(j=1), \dots, S(j=365)]$.

Remarque: afin de pouvoir comparer les valeurs de superficies cultivables en décrue relatives au régime artificiel, à celles du régime naturel de référence, ces

dernières sont évaluées par la chaîne de traitement décrite ci-dessus, en remplaçant l'ensemble des consignes de gestion par une égalité stricte entre débit entrant et sortant de la retenue.

RÉSULTATS

Soutien de basses eaux

Pour l'ensemble des scénarios de gestion envisagés, aucune défaillance importante n'est constatée en ce qui concerne le soutien des basses eaux. Ce résultat est dû à la consigne B3 de préservation de stock, classée prioritaire par rapport aux consignes A2 et A4 de fortes demandes en eau destinées à la production électrique et au soutien de crue.

Répartition des superficies cultivées en décrue et des énergies produites annuellement

La Fig. 6 montre les fonctions de répartition de S (superficie cultivée en décrue) et de W (énergie produite dans l'année), relatives aux huit scénarios de gestion extrêmes

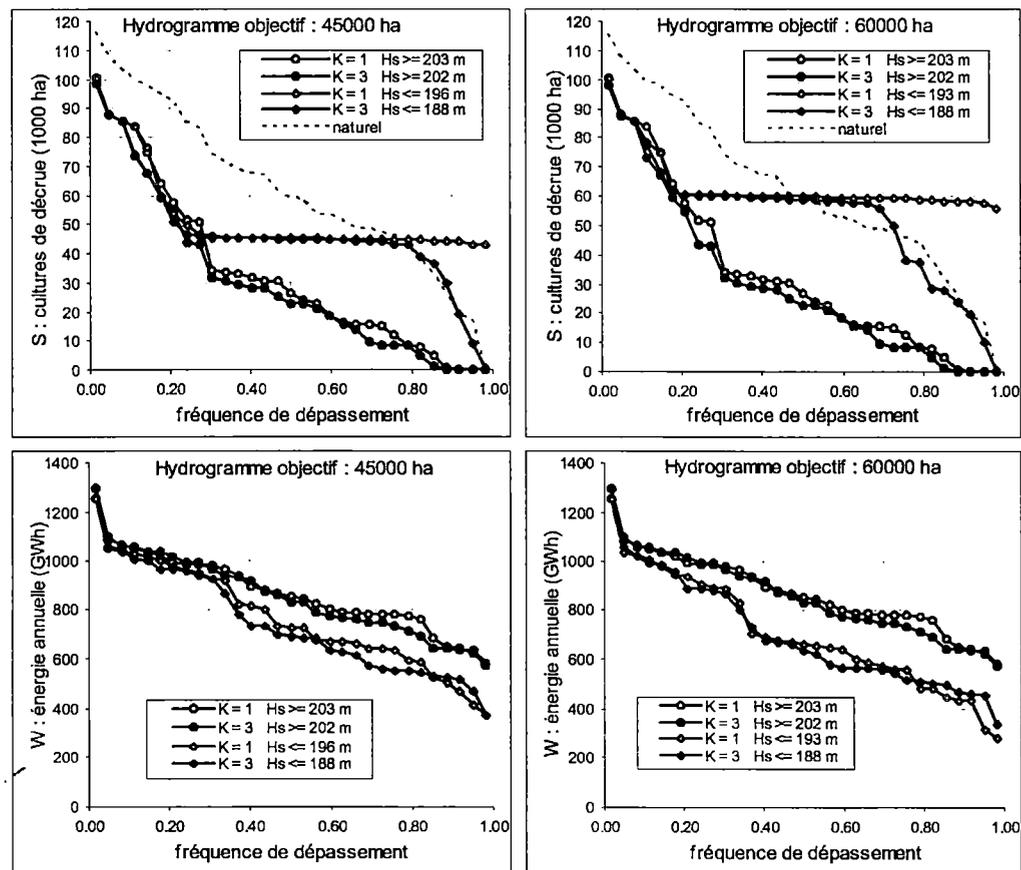


Fig. 6 Fonctions de répartition de la superficie S de cultures de décrue et de l'énergie W produite par année, pour les scénarios de gestion extrêmes envisagés.

définis par les paramètres suivants: besoins de l'irrigation égaux ($K = 1$) ou triplés ($K = 3$) par rapport aux besoins actuels; hydrogramme objectif associé à 45 000 ou 60 000 ha de cultures de décrue; seuil H_s de déclenchement très bas (soutien déclenché chaque année) ou très haut (soutien jamais déclenché). Ces fonctions de répartition extrêmes encadrent l'ensemble des résultats obtenus sur les 216 scénarios testés.

Les valeurs d'énergie produite par année se répartissent de façon assez régulière sur une échelle d'environ un à deux sans soutien de crue, et de un à trois (pour objectif 45 000 ha) ou quatre (pour objectif 60 000 ha) si le soutien de crue est déclenché chaque année. L'énergie produite diminue à mesure que le soutien de crue est plus fréquent (baisse de H_s), d'autant plus que l'objectif de superficie cultivée en décrue est important. Par contre elle est beaucoup moins sensible à l'augmentation des besoins de l'irrigation, puisque même triplés, ceux-ci correspondent à des débits turbinables.

En absence totale de soutien de crue, les superficies cultivées en décrue, très inférieures à celles du régime naturel, décroissent très légèrement lorsque l'on triple les besoins en eau de l'irrigation. Avec les besoins actuels de l'agriculture irriguée, le soutien de crue systématique permet de garantir chaque année une superficie de cultures de décrue au moins égale à l'objectif retenu, même pour 60 000 ha. Par rapport au régime naturel, ceci représente une amélioration très nette des résultats en années faibles (une année sur quatre avec l'objectif 45 000 ha, et une année sur deux avec l'objectif 60 000 ha). Par contre, l'objectif de cultures de décrue ne peut être atteint systématiquement lorsque les besoins de l'irrigation sont triplés, même si le soutien de crue est déclenché chaque année. Ceci est dû à certains arrêts du soutien de crue, qui se produisent quand le niveau de la retenue passe en dessous du stock préservé en priorité (consigne B3) pour le soutien d'été.

Moyennes de superficie cultivée en décrue et d'énergie produite par année

Pour les différents besoins envisagés pour l'irrigation ($K = 1-3$) et pour des hydrogrammes objectifs de crue visant 45 000 ou 60 000 ha de cultures de décrue, la Fig. 7 montre l'effet d'une augmentation de H_s (seuil de déclenchement du soutien de crue) sur les résultats moyens interannuels obtenus: l'énergie W produite annuellement augmente, alors que la superficie S cultivée en décrue (également décroissante avec les besoins de l'irrigation) diminue.

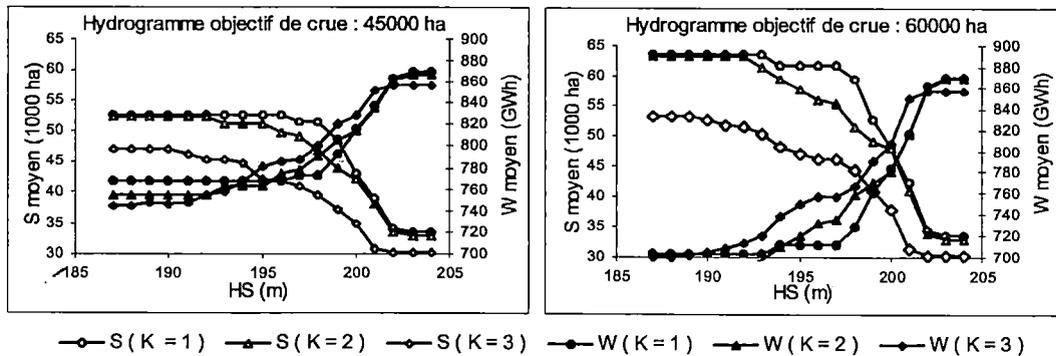


Fig. 7 Influence du seuil H_s de déclenchement du soutien de crue sur les moyennes interannuelles de la superficie S cultivée en décrue et de l'énergie W produite par année.

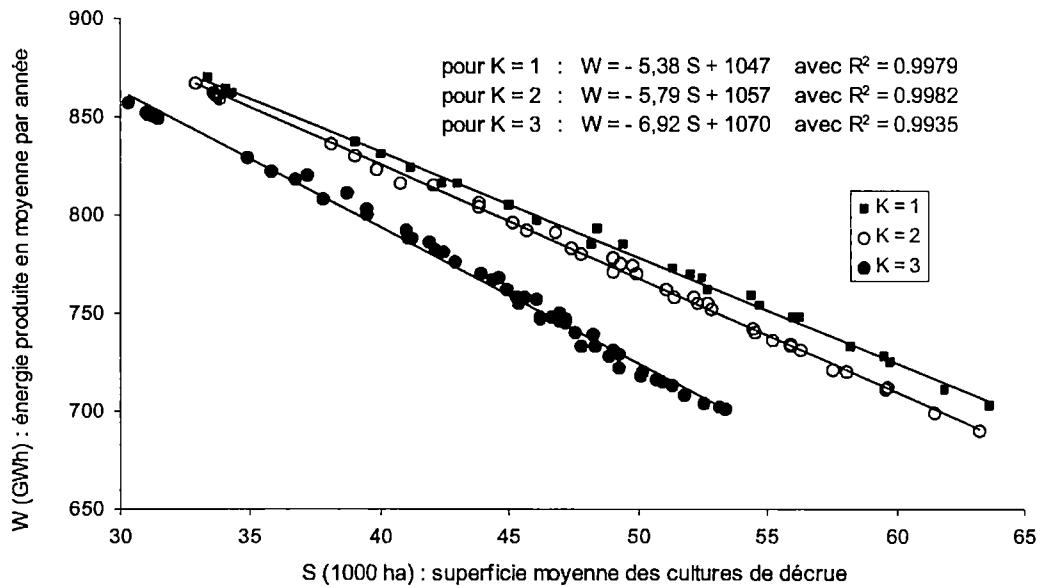


Fig. 8 Relation entre la moyenne interannuelle de W (énergie produite par année) et celle de S (superficie annuelle de cultures de décrue), pour l'ensemble des scénarios de gestion envisagés.

Dans l'hypothèse des besoins actuels de l'agriculture irriguée, un soutien de crue systématique peut être envisagé, pour garantir chaque année une superficie de cultures de décrue d'au moins 45 000 ha et de 52 000 ha en moyenne, valeurs à comparer aux surfaces minimales et moyennes relatives au régime naturel: 2000 et 63 000 ha. Dans ces conditions, la production d'énergie annuelle dépasse toujours 372 GWh et atteint en moyenne 768 GWh. En absence totale de soutien de crue, la superficie de cultures de décrue n'atteint que 33 000 ha en moyenne et peut s'annuler une année sur dix, pour une production d'énergie annuelle d'au moins 574 GWh et de 869 GWh en moyenne.

Le paramètre H_s intervenant comme seuil dans les consignes de gestion, certains des 216 scénarios testés produisent des résultats identiques. Après élimination de ces redondances, on obtient 130 résultats distincts qui, une fois regroupés, mettent en évidence des relations très étroites entre S et W pour les trois valeurs de K testées (Fig. 8). Partant du scénario de base correspondant à l'absence totale de soutien de crue, ces relations permettent de faire le constat suivant: chaque hectare supplémentaire rendu cultivable en décrue grâce à Manantali, s'accompagne d'une perte de puissance produite au barrage estimée à 614, 660 ou 789 W selon que les besoins en eau de l'irrigation sont considérés comme égaux, doublés ou triplés par rapport aux besoins actuels.

Regroupées, les trois relations $W(S)$ donnent une relation $W(S,K)$ qui reproduit les valeurs de W obtenues avec un coefficient de corrélation R^2 de 0.9965 et un écart quadratique moyen de 3.0 GWh:

$$\bar{W} = (-0.364K^2 + 0.687K - 5.705)S + (2.04K^2 + 3.25K + 1042.39)$$

où W (GWh) est l'énergie produite en moyenne par année (entre 690 et 870), S (1000 ha) est la superficie moyenne des cultures de décrue (entre 30 et 65), et K est le rapport [besoins]/[besoins actuels] pour l'agriculture irriguée (entre 1 et 3).

En considérant une superficie actuelle effective de cultures irriguées annuelles de 78 550 ha (= $0.55 \times 125\,000 + 9800$), la relation $W(S,K)$ montre que le doublement de cette superficie ($K = 2$) entraîne par hectare une perte de puissance constante produite de 7 W ou de 16 W, selon qu'on envisage une superficie moyenne de cultures de décrue de 35 000 ou 50 000 ha. Selon les mêmes hypothèses, le triplement de la superficie ($K = 3$) entraîne une perte de 23 et 39 W ha⁻¹ respectivement.

CONCLUSION

A l'heure où le barrage de Manantali commence tout juste à produire ses premiers mégawatts, l'antagonisme qui avait jusqu'alors été mis en évidence de façon purement théorique entre certains des objectifs assignés à l'ouvrage, devient une réalité qu'il va falloir affronter. Les états membres de l'OMVS doivent s'accorder sur une stratégie de gestion basée sur un compromis d'objectifs, précisant en particulier la part faite à la production d'énergie et au soutien de crue.

L'étude menée ici apporte quelques éléments qui pourraient être pris en compte pour définir cette stratégie. Grâce aux résultats du POGR, elle établit en effet une relation directe et quantifiée entre les valeurs moyennes d'énergie productible, de superficie cultivable en décrue grâce au soutien de crue, et de superficie cultivable sous irrigation grâce au soutien d'étiage. Les cultures 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.

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.

REFERENCES

- 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. *Hydrol. Continentale* 7, 3-12.
- Bader, J.-C. (1997) Le soutien de crue mobile dans le fleuve Sénégal à partir du barrage de Manantali. *Hydrol. Sci. J.* 42(6), 815-831.
- 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 (1999) Programme d'optimisation de la gestion des réservoirs, phase 2, synthèse. Annexe 3.5: Note sur le soutien de crue à date fixe sur le fleuve Sénégal. IRD, 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 (2001a) Programme d'optimisation de la gestion des réservoirs. Crue artificielle et cultures de décrue. Synthèse finale. IRD, OMVS, Dakar, Sénégal.
- IRD (2001b) Programme d'optimisation de la gestion des réservoirs. Manuel de gestion du barrage de Manantali. Version finale. IRD, OMVS, Dakar, Sénégal.
- IRD (2002) 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.
- Morel-Seytoux, H., Fahmy H. & Lamagat, J. P. (1993) A composite hydraulic and statistical flow-routing method. *Water Resour. Res.* **29**(2), 413–418.
- Rochette, C. (1974) Monographie du fleuve Sénégal. Orstom, France.
- Rodier, J. (1964) Régimes hydrologiques de l'Afrique noire à l'ouest du Congo. Mémoires Orstom no. 6, Orstom, France.

Reçu 26 juillet 2002; accepté 1 avril 2003