

11606

ORGANISATION
POUR LA MISE EN VALEUR
DU FLEUVE SENEGAL

Dakar, Juillet 1985

O.M.V.S.

HAUT-COMMISSARIAT
DIRECTION INFRASTRUCTURE REGIONALE
DIRECTION PROJET DIAMA

DDC (84). 125

REFLEXIONS SUR
"L'OPTIMISATION"
DE LA CRUE ARTIFICIELLE

F. GUERBER

11606

SOMMAIRE

1. *Pourquoi créer une crue artificielle ?*
 2. *Réactualisation des calculs hydrologiques*
 3. *Dimensionnement de la crue artificielle et relation avec la superficie cultivée en décrue*
 4. *Régularisation pendant la période transitoire*
 5. *Enjeux économiques*
 6. *Les économies d'eau possibles en période transitoire*
 - 6 a - *description des écoulements en crue*
 - 6 b - *évolution dans le temps d'une cuvette*
 - 6 c - *examen des possibilités d'économiser l'eau*
 7. *Conclusions*
- annexe 1. Réactualisation des calculs hydrologiques concernant la station de Bakel*
- annexe 2. Corrélation entre superficie cultivée en décrue et débit garant : 30 jours à Bakel*
- annexe 3. Calculs de gestion du réservoir de Manantali selon diverses années en période transitoire*
- annexe 4. Volume nécessaire au remplissage des cuvettes.*

1. Pourquoi créer une crue artificielle ?

Le fleuve Sénégal en crue déborde, sauf années exceptionnellement sèches, de son lit mineur pour inonder le lit majeur et ses cuvettes appelées "oualo".

Ce phénomène naturel est utilisé depuis des centaines d'années par les riverains qui, après le retrait progressif des eaux, pratiquent l'agriculture de décrue en début de saison sèche, puis utilisent les pâturages de décrue en fin de saison sèche.

L'aménagement hydraulique du fleuve Sénégal, qui a débuté par la construction d'un barrage anti-sel à Diama et d'un barrage réservoir à Manantali, modifiera sensiblement les conditions naturelles surtout par le réservoir implanté sur le Bafing (un des deux principaux affluents qui forment le fleuve Sénégal) et qui contrôlera environ la moitié des volumes écoulés dans le bassin versant. Sur le Bafing, les fortes crues ne seront écrêtées qu'en partie, par contre les crues faibles et moyennes peuvent être écrêtées totalement. Dans la vallée en aval de Bakel, il en résulterait, compte tenu des apports non contrôlés des autres affluents un écrêtement partiel des crues, écrêtement faible pour les fortes crues mais important pour les crues moyennes ou faibles (débit de pointe divisé par 2 environ).

La maîtrise de l'eau du fleuve a été décidée par les États riverains sur tout dans le but de développer l'agriculture irriguée. Mais il n'existe à l'heure actuelle que 40.000 ha aménagés sur un potentiel de 375 000, et le rythme annuel d'aménagement ne dépasse pas 5000 ha. Il ne sera donc pas possible avant un temps assez long d'installer sur des périmètres irrigués tous les agriculteurs de la vallée (environ 365 000 UTH en 1990) qui doivent donc continuer à pratiquer l'agriculture de décrue. C'est pour quoi il est prévu de délivrer pendant cette période "transitoire" une crue artificielle à partir du réservoir de Manantali.

Il faut observer toutefois que :

a) Les objectifs à assigner à cette crue artificielle ne sont pas précisément définis : faut-il maintenir une surface cultivée totale constante (en agriculture irriguée plus agriculture de décrue) ? ou une production constante, ou un nombre d'emplois constant, ou un revenu constant ? Selon la réponse, on aboutira à des évolutions très différentes des surfaces à cultiver en décrue en fonction d'une évolution donnée des surfaces irrigables.

b) On peut espérer supprimer à terme la nécessité d'une crue annuelle pour l'agriculture grâce aux aménagements hydroagricoles, par contre cela est moins évident pour les pâturages, la reproduction et le développement de nombreuses espèces de poissons, et les forêts qui ont besoin d'une submersion annuelle, à moins d'envisager des aménagements compensatoires (cultures fourragères et sylviculture irriguées, pisciculture).

2. Réactualisation des calculs hydrologiques

La sécheresse marquée des dernières années incite à réactualiser les calculs hydrologiques.

Depuis 1968, on assiste en effet à une série ininterrompue d'années sèches, avec en 1983 et en 1984 les volumes écoulés les plus faibles jamais enregistrés. La science hydrologique utilise des lois statistiques qui donnent en principe des résultats d'autant plus précis que le nombre d'années de mesures est plus grand. Toutefois, il est possible aussi qu'un phénomène physique non réversible se soit produit qui ait entraîné un changement climatique définitif (comme une destruction massive du couvert végétal ayant entraîné une augmentation de l'albedo).

On a donc effectué en annexe 1 deux séries d'ajustements statistiques l'un sur l'ensemble des données de la période 1903-1984, l'autre sur la période sèche 1968-1984, et qui donnent les résultats suivants :

		période 1968/1984	période 1903/1984
débit de pointe	médian	3100 m ³ /s	4100 m ³ /s
	décennal humide	5200 m ³ /s	7000 m ³ /s
	centennal humide	8000 m ³ /s	10000 m ³ /s
débit garanti 30 jours	médian	1700 m ³ /s	2800 m ³ /s
	décennal sec	1000 m ³ /s	1800 m ³ /s
	décennal humide	3200 m ³ /s	4800 m ³ /s
volume	médian	13,2 10 ⁹ m ³	22,1 10 ⁹ m ³
	décennal sec	7 10 ⁹ m ³	11,3 10 ⁹ m ³
	décennal humide	19,5 10 ⁹ m ³	32,9 10 ⁹ m ³

La comparaison des deux colonnes montre bien l'incertitude dans laquelle se trouve actuellement le projecteur. Il faut donc recommander que, dorénavant, chaque problème soit étudié dans les deux cas d'ajustement, et que les choix soient effectués en fonction de critères économiques et de sécurité. Par exemple, en ce qui concerne la protection par endiguement contre les pointes de crue, il apparaît normal de conserver en général les chiffres issus de l'ajustement sur la période la plus longue, ceci par sécurité et malgré les chiffres plus faibles que donne l'ajustement sur la période courte. Toutefois, dans les cas où le coût de l'endiguement ainsi défini deviendrait prohibitif vis à vis des bénéfices attendus, il serait envisageable de caler les endiguements par rapport à des débits plus faibles.

En ce qui concerne la crue artificielle, on verra ci-après qu'elle est statistiquement reliée au débit garanti 30 jours, et pour l'étude des questions liées à la décrue, il vaut mieux par sécurité prendre en compte les chiffres de l'ajustement sur la période récente (68 à 84).

En ce qui concerne le volume écoulé annuel, on peut remarquer que, même dans le cas le plus défavorable, le débit moyen annuel correspondant est en moyenne de 419 m³/s, donc reste supérieur au débit régularisé de 300 m³/s. Il semble donc à priori que le réservoir de Manantali pourra fournir ce qu'on attend de lui. Il faut aussi remarquer que ce qu'on considérait en 1978, au moment des études du barrage de Manantali comme le volume écoulé dépassé neuf années sur dix (13,6 millions de m³) est à peu de chose près égal au volume écoulé assuré une année sur deux seulement pendant la période 1968 -1984 (13,2 milliards de m³).

3. Dimensionnement de la crue artificielle et relation avec la superficie cultivée en décrue

Le dimensionnement de la crue artificielle a été effectué une première fois en 1972 par SOGREAH au moyen de son modèle mathématique de crues (référence 1). La crue préconisée était une crue voisine de celle de 1970 et qui garantissait un niveau à Bakel pendant 1 mois. Cette crue

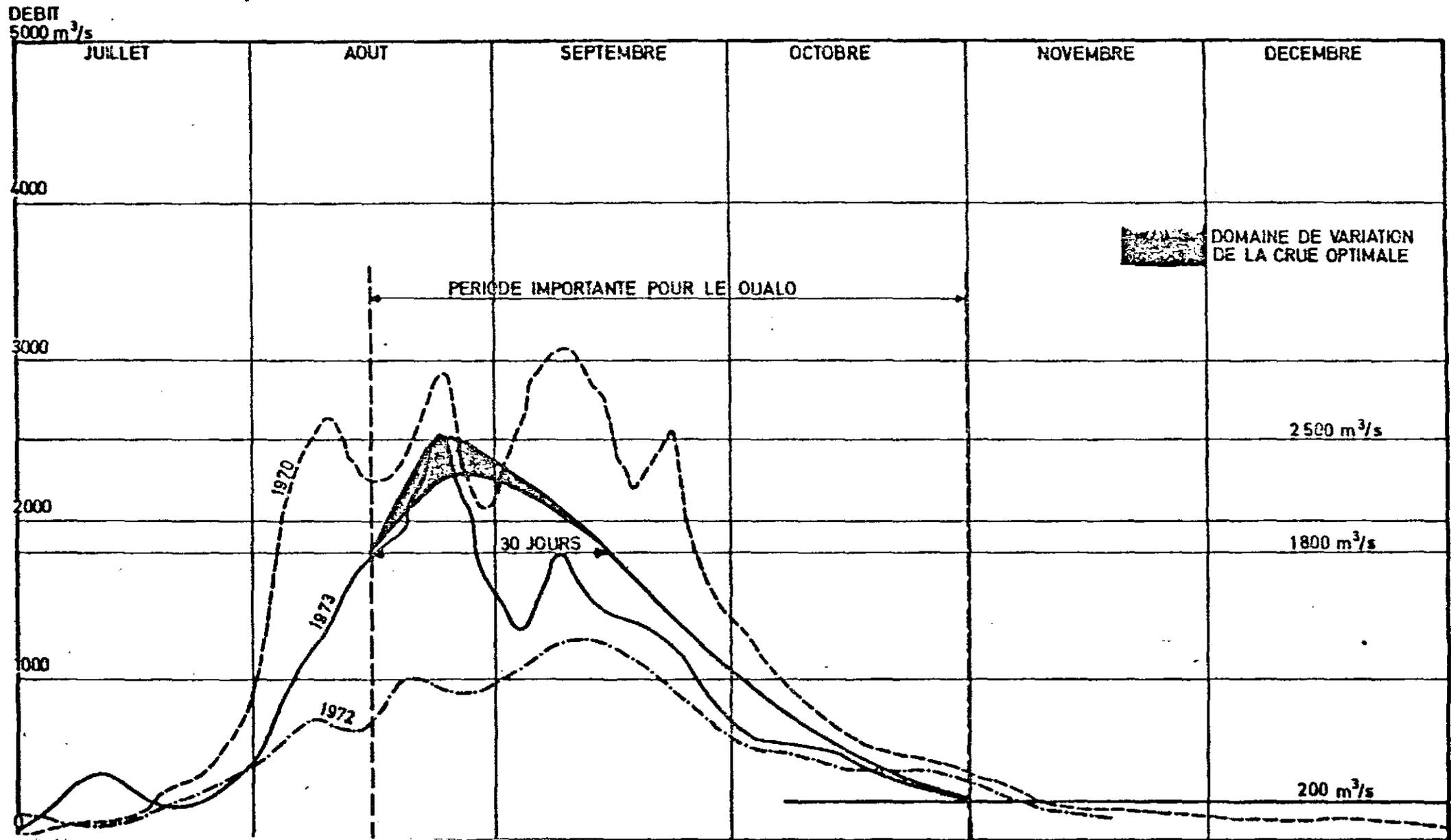
correspondait à un volume de 14 à 15 milliards de m^3 sur trois mois, avec un débit dépassé 30 jours de près de $3000 m^3/s$, et inondait suffisamment de superficies (336700 ha) pour que l'on puisse espérer la mise en culture de 100000 ha. On parle cependant dans d'autres documents une crue de $2500 m^3/s$ pendant 1 mois, qui correspondrait à un volume écoulé de 6,5 milliards de m^3 sur un mois et de 12,2 milliards de m^3 sur 3 mois.

Un deuxième calcul a été effectué en 1978 par le groupement Manantali (référence 2), qui préconisait une crue de $1800 m^3/s$ garanti pendant un mois avec une pointe comprise entre 2300 et $2500 m^3/s$. Ceci représente 5,6 milliards de m^3 pendant un mois, et en fait, compte tenu de l'augmentation et surtout de la diminution progressive des débits, 9,9 milliards de m^3 sur trois mois. Ce dimensionnement était justifié par l'exemple de la crue de 1973. De plus la crue était calée dans le temps du 15 septembre au 15 octobre pour les débits dépassant $1800 m^3/s$. On trouvera à la figure 1 ci-après les hydrogrammes de crue correspondants.

Il se trouve qu'il existe une corrélation assez bonne entre le débit garanti 30 jours et les superficies cultivées en décrue (coefficient de corrélation de 0,79). On trouvera ce calcul en annexe 2. D'après cette corrélation, le débit à garantir 30 jours pour obtenir une surface cultivée de 100000 ha serait plus proche de $2500 m^3/s$ que de 1800. Toutefois, il faut remarquer qu'il n'y a pas de relation physique entre le débit garanti 30 jours et la surface cultivée, qui reste toujours très inférieure à la surface inondée. Des tas d'autres facteurs interviennent tels que les types de sols, la main d'oeuvre disponible à certaines périodes, la précocité de la décrue, la récolte prévue en culture pluviale etc. La relation reste statistique, et à partir du moment où la crue sera artificielle et régulière, on peut espérer que les paysans pourront cultiver une proportion plus importante des superficies inondées. Par conséquent une crue plus faible, mais garantie, devrait permettre la mise en valeur des 100000 ha. La crue de $1800 m^3/s$ devrait donc suffire.

Ceci a été, dans une certaine mesure, confirmé par le passage sur modèle mathématique de la crue définie par le groupement Manantali, en tenant compte des cuvettes qui seront endiguées à moyen terme (référence 3). En effet l'endiguement de certaines cuvettes rehausse les cotes d'inondation pour un même débit entrant dans la vallée. On obtient en définitive des niveaux d'inondation comparables à ceux d'une crue moyenne (1970).

HYDROGRAMME DE CRUE OPTIMAL A BAKEL EN COMPARAISON AVEC QUELQUES CRUES NATURELLES



4. Régularisation pendant la période transitoire

Si l'on retient donc comme crue artificielle la crue de 1800 m³/s en un mois avec une pointe à 2500 m³/s, un chiffre vient immédiatement à l'esprit : le volume écoulé total à Bakel en 1984, de 6,9 milliards de m³, n'aurait pas permis de délivrer la crue artificielle (9,9 milliards de m³ sur 3 mois) ni les besoins en eau de l'irrigation (environ 1 milliard de m³ sur l'année pour les 40000 ha), à moins de vider dangereusement la réserve de Manantali.

Il est cependant inévitable d'encourir certaines défaillances en cas d'années exceptionnelles ; il faut donc examiner la fréquence de tels événements. La méthode permettant de définir les fournitures d'eau garanties en fonction de diverses fréquences serait une simulation du remplissage du réservoir de Manantali avec un pas de temps de 15 jours, et sur l'ensemble des années de mesures. Pour simplifier, on a effectué en annexe 3 des simulations sur trois années-types, ce qui ne fournit que des ordres de grandeur. Ces années-types sont d'autre part choisies sur la période 1903-1978.

Les calculs supposent qu'il faut :

- assurer la crue artificielle
- irriguer 100000 ha (horizon 2000)
- maximiser la production d'énergie.

Les conclusions sont claires :

a) Si on n'admet pas de changement climatique irréversible, le réservoir de Manantali est capable de satisfaire tous les besoins en année moyenne ou humide, bien qu'en année humide la crue soit plus importante que la crue artificielle, et retardée dans le temps. Par contre en année décennale sèche, il y a impossibilité de satisfaire pleinement à la fois l'agriculture de décrue et la production énergétique si la puissance maximale envisagée (200 MW) était installée. (Si la priorité est accordée à l'agriculture, la production énergétique serait divisée par deux environ). Il est toutefois possible de délivrer la crue artificielle en année décennale sèche sans aucun problème tant que la centrale hydroélectrique n'est pas construite.

b) Si on ne considère que les dernières années, ce qui est appelé année décennale sèche en a) ci-dessus, devient en fait l'année moyenne (cf § 2 ci-avant, dernier alinéa). Il y aurait donc conflit entre agriculture de décrue et énergie une année sur deux, et même impossibilité de délivrer la crue artificielle avec une fréquence non négligeable.

Il y a donc des risques de défaillance inquiétants au cas où la production énergétique maximale serait envisagée rapidement, ou bien, même en l'absence de production énergétique, si la période de sécheresse actuelle devait se prolonger.

Ce constat incite à étudier sérieusement les possibilités d'économiser l'eau. Or le plus gros consommateur d'eau est de loin l'agriculteur de décrue pour lequel il est facile d'aligner des chiffres traduisant une impression de "gaspillage" : besoin en eau de 9,9 milliards de m³ sur 3 mois dont 5 milliards lâchés depuis Manantali en année moyenne, surface cultivée en décrue égale à 45% seulement de la superficie inondée, besoins en eau de 100000 m³ par hectare cultivé, ou de 200000 m³ par tonne de céréales produites !

5. Enjeux économiques

Avant d'étudier plus en détail les moyens d'économiser l'eau, il convient d'avoir en tête quelques ordres de grandeur permettant de cerner l'importance économique de l'agriculture de décrue.

La production que l'on pourrait attendre de 100000 ha cultivés en décrue est d'environ 50000 tonnes de céréales (sorgho essentiellement). Ceci représente un chiffre d'affaire de 4 milliards de Fcfa environ en valeur économique (valorisée au prix de substitution à l'importation) et de 3 milliards de Fcfa en valeur financière. Le revenu paysan est quasiment égal à cette valeur financière puisque les charges d'exploitation sont négligeables (semences uniquement).

Le coût de l'eau stockée à Manantali peut être défini très grossièrement comme le coût de l'investissement divisé par le volume stocké et par la durée de vie de l'ouvrage, augmenté du coût d'exploitation annuel divisé par le volume stocké annuel.

$$\text{Ce qui donne } \frac{172 \cdot 10^9 \text{ Fcfa}}{9 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \times 75 \text{ ans}} + \frac{258 \cdot 10^9 \text{ Fcfa}}{9 \cdot 10^9} = 0,28 \text{ Fcfa/m}^3$$

Le coût de l'eau fournie pour la culture de décrue (5 milliards de m³ en moyenne lâchés de Manantali) serait donc de l'ordre de 1,4 milliard de Fcfa par an.

Ce coût serait beaucoup plus élevé dans le cas où la centrale hydro-électrique serait installée et où il faudrait valoriser le m³ d'eau en fonction du gain économique que procure la production d'un Kwh d'origine hydroélectrique vis à vis de la production d'un Kwh à partir de fuel.

Sur le plan strictement économique, l'agriculture de décrue paraît viable tant que la production énergétique n'est pas possible. Ceci ne signifie pas qu'il faille forcément accorder la priorité à la production d'énergie vis à vis de l'agriculture de décrue, car celle-ci apporte d'autres avantages non chiffrés (emploi, fixation des populations à leur terroir, sous produits pour l'élevage etc...).

6. Les économies d'eau possibles en période transitoire

Les différents moyens envisageables pour économiser l'eau sont les suivants :

- alimenter les cuvettes par pompage
- créer des seuils en travers du fleuve Sénégal permettant de relever les lignes d'eau, et donc de mieux remplir les cuvettes avec un même débit
- modifier l'hydrogramme de la crue artificielle en se contentant de niveaux d'inondation plus faible, ou bien en adoptant par exemple un débit de pointe plus élevé donc assurant un remplissage plus rapide des cuvettes, et permettant de réduire la durée de la crue

- créer des chenaux permettant l'alimentation gravitaire des cuvettes avec des ouvrages de garde retenant à volonté l'eau à la décrue. Ce système peut être complété par la construction de diguettes submersibles en courbes de niveau à l'intérieur de la cuvette.

Avant de se prononcer sur chacune de ces possibilités, il convient de décrire en détail le phénomène physique de la crue et l'évolution envisageable en fonction de l'aménagement hydroagricole de la vallée.

6 a) Description des écoulements en crue

Les cuvettes inondables sont en général reliées au fleuve par des chenaux naturels qui ne sont alimentés qu'à partir d'un certain niveau du fleuve, ces chenaux présentant souvent un "col" à franchir. Les débordements en nappe par-dessus les berges n'ont lieu que pour des crues importantes.

Le fleuve, lors d'une crue moyenne, voit ses lignes d'eau relevées de 1 à 10m par rapport à l'étiage, selon que l'on se situe dans le delta ou dans la haute vallée.

Parmi les quantités d'eau écoulées à Bakel, une partie donc déborde dans le lit majeur tandis qu'une autre partie s'écoule dans le lit mineur jusqu'à la mer. Le calcul de l'annexe 4 effectué dans le cas de la crue artificielle définie au § 3 ci-avant montre que le remplissage des cuvettes nécessite un volume de 3,3 milliards de m³. Ce volume n'est cependant pas fourni simultanément à toutes les cuvettes compte tenu du temps de propagation de la pointe de crue entre la haute vallée et le delta (30 jours environ). Le volume "gaspillé", c'est-à-dire le volume qui transite dans le lit mineur pour se jeter à la mer et le volume nécessaire pour compenser l'évaporation, s'élève dans ce cas à 6,6 milliards de m³ sur 3 mois soit 67%. Le même calcul dans le cas de la crue de 1970 donne un pourcentage de 60% (crue forte) et dans le cas de la crue de 1968 un pourcentage de 77% (crue faible). (référence 1).

6 b) Evolution dans le temps d'une cuvette

Les aménagements hydroagricoles envisagés actuellement consisteront en général en un endiguement progressif des cuvettes, de façon à ce que les surfaces irrigables suivent l'évolution démographique et une augmentation progressive de la superficie attribuée à chaque actif agricole. On évitera en général d'endiguer d'emblée la totalité d'une cuvette. D'autre part, il est souvent prévu de ne pas aménager les zones les plus basses des cuvettes, et de les laisser comme champ d'épandage des eaux de drainage pour réduire les débits d'équipement des stations d'exhaure. Ces zones d'épandage peuvent éventuellement ensuite être utilisées comme zone de culture de décrue, mais avec un calendrier retardé par rapport à l'optimum. Les chenaux et ouvrages construits pour le drainage peuvent alors servir au remplissage des zones basses en question.

6 c) Examen des possibilités d'économiser l'eau

- 6 c.1. - Le pompage semble tout à fait exclu par les investissements qu'il représente, mais surtout par les frais de fonctionnement. Il faudrait en effet pomper un volume de l'ordre de 30 000 m³/ha (3,3 milliards de m³ définis en 4a ci-dessus par 100 000 ha), soit un coût moyen de 130 000 Fcfa/ha pour une récolte de 0,5 T/ha correspondant à un chiffre d'affaire de 30 000 Fcfa/ha.

- 6 c.2 - La création de seuils en travers du fleuve semble également à exclure. En effet il serait dramatique de rehausser, ne serait-ce que d'une dizaine de centimètres les lignes d'eau de la crue centennale. En effet ces lignes d'eau servent à dimensionner les endiguements de périmètres hydroagricoles dont le coût est estimé actuellement à 1 million de Fcfa/ha, soit 375 milliards de Fcfa pour l'ensemble de la vallée (ce qui entre parenthèse permet d'envisager raisonnablement la construction à long terme d'un autre barrage sur le Bakoye ou en aval de Manantali, ayant pour seule vocation d'écrêter les crues).

Le rehaussement d'une di zaine de centimètres des endiguements de la vallée coûterait déjà plusieurs dizaines de milliards de Fcfa. Les seuils envisagés devraient donc offrir une section d'écoulement très voisine de celle du lit mineur, ce qui conduirait à des ouvrages au coût prohibitif (de conception voisine de celle du barrage de Diama) en regard du chiffre d'affaire annuel que représente la culture de décrue (4 milliards de Fcfa).

- 6 c. 3 - La modification de l'hydrogramme est possible de deux façons :

Il est tout d'abord envisageable de remplir les cuvettes jusqu'à un niveau moins élevé, puisque la crue prévue inonde beaucoup plus de superficie (231 700 ha) qu'il n'y a de terre cultivée en définitive (100000 ha). Toutefois on ne cultivera jamais à 100% les superficies inondées puisqu'il y aura toujours des zones trop lisses et des sols inaptes, sans parler des contraintes de main d'oeuvre. Une réduction de la surface inondée risque de se répercuter presque proportionnellement sur la surface cultivée. D'autre part sur les zones inondées se développent des pâturages après le retrait des eaux, et des niveaux d'inondation élevés favorisent aussi la régénération des forêts de "gonakié" (acacia Sénégal) et la production de poisson. La réduction des niveaux à atteindre ne paraît donc pas souhaitable dans un premier temps.

Il est ensuite envisageable de provoquer un débit de pointe plus fort qui remplirait les cuvettes plus rapidement et permettrait peut-être de réduire la durée de la crue. Il semble d'après la référence 1 et l'annexe 4 que le rapport entre le volume d'eau remplissant les cuvettes et le volume d'eau écoulé est proche de l'optimum pour la crue artificielle adoptée. Mais il faut optimiser surtout le volume d'eau inutilisée.

D'autre part l'importance des volumes à déverser dans les cuvettes (3,3 milliards de m³) conduit à une durée minimale de 15 à 20 jours si on ne veut pas risquer des érosions trop importantes. L'étude SOGREAH (référence 1) a d'ailleurs montré qu'il faut prolonger un certain temps le débit de pointe pour que le remplissage soit suffisant en aval de la vallée, malgré l'amortissement considérable de l'onde de crue. Enfin la décrue

doit être régulière pour que les cuvettes ne se vident pas trop rapidement et que les cultures ne souffrent pas d'un déficit hydrique. Or la décrue progressive représente plus de 3 milliards de m³ sur les 9,9. Cette phase de décrue deviendra nécessaire aussi pour les zones basses d'épandage de périmètres hydroagricoles pouvant être cultivés en décrue vers le mois de décembre.

Malgré cela, il serait intéressant d'étudier sur le modèle mathématique mis au point par SOGREAH divers hydrogrammes pour rechercher l'optimum, c'est-à-dire celui qui remplirait les casiers aux niveaux souhaités mais avec un volume écoulé moindre. En outre, il serait peut-être possible de mieux maîtriser la date de remplissage des casiers.

Recalibrer les chenaux d'alimentation des cuvettes et les munir d'ouvrage de garde permettrait un remplissage beaucoup plus rapide des zones à inonder, et avec une dénivelée beaucoup plus faible entre le niveau du fleuve et le niveau de la cuvette. Les mêmes niveaux d'inondation seraient atteints avec des niveaux du fleuve, et donc des débits, plus faibles. La fermeture de l'ouvrage de garde permettrait de conserver l'eau dans les cuvettes tout en évitant la décrue progressive en deux mois, et ceci permettrait certainement d'améliorer les rendements.

C'est le type d'aménagement qui a été retenu pour le lac RKiz, et on peut se rendre compte que cela nécessite des investissements non négligeables (50000 Fcfa/ha rien que pour le recalibrage, dans ce cas qui est certainement plus favorable que la moyenne). Toutefois cela pourrait se justifier dans la mesure où ces travaux seraient intégrés dans l'aménagement hydroagricole futur du périmètre (cf § 4b ci-avant).

La construction de diguettes submersibles en courbes de niveau permettraient une gestion plus fine de l'eau, un gain supplémentaire sur les rendements et une augmentation du rapport entre surface cultivée et surface inondée. ^{(Complémentaire avait sans doute plus coûteux à l'hectare (investissement)} Cet investissement ^(et entretien) que le simple recalibrage des chenaux. Ce type d'aménagement a été projeté à Madagascar sur le lac Bermarivo, mais il ne semble pas à conseiller ici dans un premier temps.

Le recalibrage peut être étudié aussi au moyen du modèle mathématique, et éventuellement avec des investigations topographiques complémentaires pour en préciser le coût.

7. Conclusion

Le maintien d'une crue artificielle sera nécessaire pendant une période transitoire en attendant que l'irrigation soit suffisamment développée, et peut-être même à plus long terme pour l'élevage et les forêts.

Il risque d'y avoir impossibilité de satisfaire tous les consommateurs d'eau si la période de sécheresse actuelle se poursuit ou si la production d'énergie hydroélectrique est envisagée pendant la période transitoire.

Dans ces cas-là, il sera possible d'économiser l'eau par divers moyens, mais vraisemblablement en recalibrant les chenaux naturels d'alimentation des cuvettes et en les munissant d'ouvrages de contrôle des plans d'eau. Les investissements pourraient se justifier dans la mesure où ils seraient utilisés par les aménagements hydroagricoles ultérieurs.

Il faut donc dans un premier temps utiliser l'étude de gestion des ouvrages communs pour mieux préciser les besoins en économie d'eau et cerner les moyens à mettre en oeuvre. Cette étude devrait définir aussi les termes de référence des investigations coûteuses qui pourraient se révéler nécessaires (topographie - enquêtes...).

Enfin, il semble nécessaire que les Etats membres s'organisent mieux pour étudier, encadrer et planifier l'agriculture de décrue, qui devrait faire l'objet, de la part des sociétés nationales de mise en valeur, d'une attention égale à celle dont jouit l'agriculture irriguée.

Références

1. *Etude de la crue de 1970, de la crue de 1968 et des trois crues artificielles - SOGREAH 1972.*
2. *Etude du barrage et de l'usine hydroélectrique de Manantali - Mission A1.4 : Agriculture - Groupement Manantali 1978.*
3. *Etudes de réhabilitation de factibilité et d'avant-projets détaillés de périmètres d'irrigation sur la rive gauche du fleuve Sénégal. Titre 1 : données communes - résultats des investigations complémentaires. Modèle mathématique du fleuve Sénégal à l'aval de Bakel pièces 1.1 et 1.5.*
4. *Les cultures de décrue et l'hypothèse 300 m³/s - JUTON Août 70.*

ANNEXE 1 - REACTUALISATION DES CALCULS
HYDROLOGIQUES CONCERNANT LA STATION DE BAKEL

1. Les données

Les chiffres sur lesquels seront menés les calculs statistiques sont ceux figurant dans le document de l'OMVS intitulé "hydrologie du fleuve Sénégal de Bakel à St-Louis - avril 1978 pour les années 1903 à 1977.

Pour la période de sécheresse qui sévit depuis 1968, les chiffres sont donnés dans le tableau suivant.

Il faut noter que des différences sensibles existent entre ces chiffres et ceux préconisés par l'ORSTOM, sur la base de courbes de tarage différentes. Cette incertitude pourrait être levée au moyen d'une expertise et d'une campagne de jaugeages.

Période de sécheresse 1968-1985

<u>débits en m³/s</u>	<u>Q_{pointe}</u>	<u>Q₃₀</u>	<u>Q_{moyen}</u>
1968/69	2902	1196	402
1969/70	3764	2693	762
1970/71	3425	2324	540
1971/72	4344	2624	599
1972/73	1428	1057	263
1973/74	2546	1730	361
1974/75	5799	3792	647
1975/76	3793	2594	493
1976/77	1728	1184	370
1977/78	2036	1054	288
1978/79	3252	1510	505
1979/80	1981	899	303
1980/81	3885	1600	401
1981/82	3128	1555	433
1982/83	2520	1019	310
1983/84	1191	741	220
1984/85	899	660	219

Sources : - hydrologie du fleuve Sénégal de Bakel à St-Louis - OMVS
avril 78 pour les années 1968 à 1977

- annuaires hydrologiques - Ministère de l'Hydraulique du Sénégal
pour les années 1978 à 1985.

2. Débit de pointe

- 2 a - Pour la période 1903-1984, on obtient les paramètres suivants.

moyenne $m = 7\,412,80 \text{ m}^3/\text{s}$

écart type $\sigma = 1\,813,94 \text{ m}^3/\text{s}$.

En adoptant comme l'ORSTOM en 1965 une loi de Gumbel sur l'échantillon des mesures de $Q + 3000 \text{ m}^3/\text{s}$, les quantités sont les suivantes :

$F = 1/2 \quad Q_p = 4124 \text{ m}^3/\text{s}$, débit de pointe dépassé une année sur deux
(année médiane)

$F = 1/10 \quad Q_p = 6794 \text{ m}^3/\text{s}$, débit de pointe dépassé une année sur dix
(année décennale humide)

$F = 1/100 \quad Q_p = 10\,124 \text{ m}^3/\text{s}$, débit de pointe dépassé une année sur cent
(année centennale humide).

- 2 b - Pour la période 1968-1984, on a les paramètres suivants

moyenne $m = 2860,06 \text{ m}^3/\text{s}$

écart type $\sigma = 1268,70 \text{ m}^3/\text{s}$.

En adoptant diverses lois statistiques, on aboutit aux quantités suivantes :

débit de pointe en m^3/s	loi de Galton	loi de Gumbel	loi de Fréchet	loi de Pearson III
$F = 1/2$	3129	3223	2381	2673
$F = 1/10$	5382	5090	4931	4555
$F = 1/100$	8399	7419	12232	6601

On retrouve là les caractéristiques des lois statistiques, certaines ayant tendance à exagérer les quantités de fréquence rare (Fréchet), d'autres à les sous-estimer (Pearson III).

Le graphique de la page suivante montre que les lois de Galton et Gumbel sont les mieux adaptées, et on peut retenir en définitive les valeurs de 3100 m³/s pour l'année médiane, 5200 m³/s pour l'année décennale et 8000 m³/s pour l'année centennale.

3. Débit garanti 30 jours

- 3 a - Sur la période 1903-1984, on a les paramètres suivants :

$$m = 2763,98 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\alpha = 1184,73 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Selon la loi adoptée, on obtient les quantités suivantes :

débit garanti : 30 jours en m ³ /s	Gauss	Gumbel	Galton
$F = 1/2$	2764	3103	3007
$F = 1/10$	4280	4847	5087
$F = 9/10$	1248	1992	17778

Les lois de Gumbel et Galton sont mieux adaptées pour décrire un phénomène lié au débit de pointe.

- 3 b - Sur la période 1968-1984, on a les paramètres suivants :

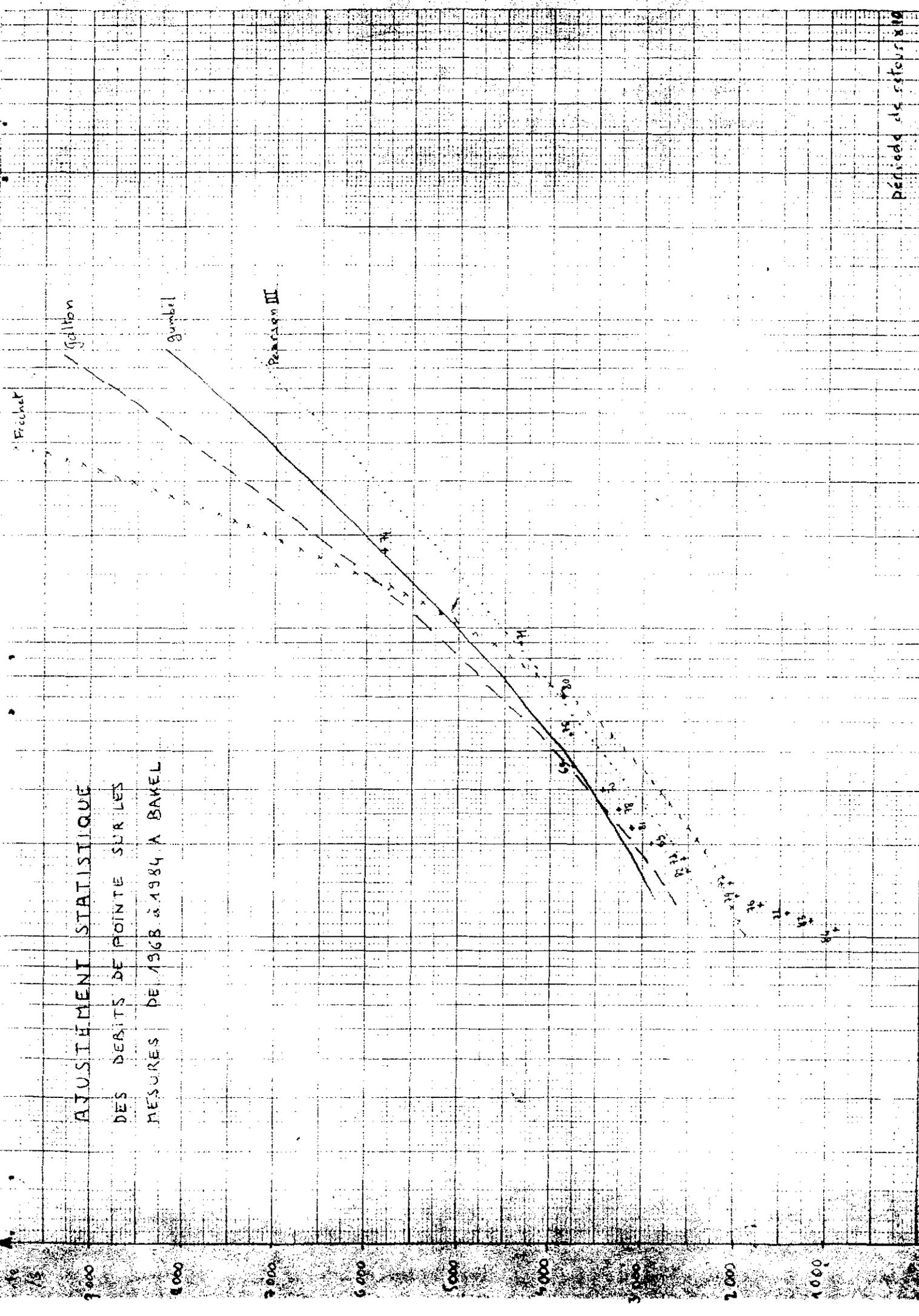
$$m = 1660,71 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\alpha = 862,57 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ce qui conduit aux quantités suivantes :

débit garanti : 30 jours en m ³ /s	Gauss	Gumbel	Galton
$F = 1/2$	1661	1907	1871
$F = 1/10$	2765	3177	3498
$F = 9/10$	557	1099	1001

ADJUSTEMENT STATISTIQUE
DES DEBITS DE POINTE SUR LES
MESURES DE 1968 à 1984 A BAKEL



Période de retour en

2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100

4. Volume écoulé annuel

4a - Sur la période 1903-1984, on a les paramètres suivants :

$$m = 700,50 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\sigma = 267,53 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ce qui donne, par la loi de Gauss qui s'applique dans ce cas, les quantités suivantes :

fréquence	débit moyen annuel en m^3/s	volume écoulé en milliards de m^3
$F = 1/2$	700,5	22,1
$F = 1/10$	1043	33,9
$F = 9/10$	358	11,3

4 b - Sur la période 1968-1984, on a les paramètres suivants :

$$m = 418,59 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\sigma = 154,63 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ce qui donne par la loi de Gauss les quantités suivantes :

fréquence	débit moyen annuel en m^3/s	volume écoulé en milliards de m^3
$F = 1/2$	419	13,2
$F = 1/10$	616,5	19,5
$F = 9/10$	221	7,0

A noter que le volume écoulé médian, qui est estimé à 22,1 milliards de m^3 sur la période 1903-1984, était estimé à 23,2 milliards de m^3 sur la période 1903-1977. La réduction est donc faible (5%) si on prend en compte l'ensemble des données ; elle est beaucoup plus importante si on se limite à la période 1968-1984 : 13,2 milliards de m^3 (44% de réduction).

ANNEXE 2 : CORRELATION ENTRE SUPERFICIE CULTIVEE
EN DECRUE ET DEBIT GARANTI 30 JOURS A BAKEL

1. Les données

Pour ce calcul, on utilisera les chiffres figurant dans l'étude du barrage de Manantali (volume 5 régularisation) qui sont les suivants.

<u>Année</u>	<u>débit dépassé 30 jours à Bakel (en m³/s)</u>	<u>superficie cultivée en décrue (en m³/s)</u>
1946	2697	100000
1947	2480	105000
1950	5275	119999
1951	3035	116000
1952	2730	98000
1953	2052	88000
1954	3660	131000
1955	3992	101000
1956	3580	142000
1957	3620	143000
1961	3425	78000
1963	2135	94000
1964	4230	109000
1965	4654	123000
1966	3168	117000
1967	4365	140000
1968	1196	86000
1969	2693	95000
1970	2324	110000
1972	1057	15000
1973	1730	97000
1976	1184	30000
1977	1054	30000
1978	1510	62500
1980	1600	66000

un premier ajustement sur l'ensemble de ces données fournit la régression linéaire suivante $S_{ha} = 38\ 826 (Q_{m3/s} - 327)$ avec un coefficient de corrélation de 0,73.

Il paraît meilleur d'éliminer les cinq couples de données correspondant à des débits $> 3750\ m3/s$ (fréquence décennale environ), car pour des débits très importants, il ne peut y avoir une mise en valeur proportionnelle puisque la main d'oeuvre disponible devient le facteur limitant. On obtient alors la régression linéaire suivante :

$S_{ha} = 50\ 100 (Q_{m3/s} - 560)$ qui est effectivement meilleure puisque le coefficient de corrélation atteint 0,79.

On obtient ainsi un résultat assez différent de celui de Juton en 1970 (référence 4).

Annexe 3 : Calculs de gestion du réservoir de
Manantali selon diverses années.

3.1 Objectifs et conditions des calculs

On effectue ci-après un certain nombre calculs sommaires de façon à fixer des ordres de grandeur des bénéfices que l'on peut tirer d'une gestion optimale du barrage de Manantali, selon des années d'hydraulicité assez différentes, et pendant la première phase, dite transitoire, du programme (horizon 2000).

On suppose donc qu'il faut irriguer 100.000 ha et créer une crue artificielle permettant la culture en décrue de 100.000 hectares, tout en turbinant au maximum les lâchures destinées à l'agriculture. Les hypothèses seront toutes tirées de l'étude du Groupement Manantali, aussi bien en ce qui concerne la reconstitution des années hydrologiques (volume 1.5 annexes 3.1 et 3.2), que les courbes hauteur-surface-volume du réservoir (volume 1.4-tableau 13 - efficacité de 65%) et les caractéristiques de la centrale hydroélectrique (projet définitif). Il faut noter cependant que :

- les besoins en eau pour l'irrigation semblent très sous-estimés, mais cela n'est pas grave en phase transitoire où les surfaces irriguées sont faibles et les besoins faciles à satisfaire ;
- il y a deux crues artificielles : celle préconisée par SOGREAH d'après étude sur modèle mathématique (2500 m³/s assurés pendant un mois) et celle préconisée par le Groupement Manantali (1800 m³/s assurés pendant un mois, 2500 m³/s en pointe seulement). Les volumes d'eau mis en jeu étant très différents (plus de 2 milliards de m³ d'écart), on étudiera les deux crues dans les cas critiques (années sèches). Dans les autres cas, c'est l'hypothèse de SOGREAH que l'on prendra en compte car elle paraît plus apte à permettre la culture en décrue de 100.000 hectares, compte tenu des statistiques dont on dispose sur les superficies cultivées en décrue.

Dans ces conditions les besoins à satisfaire chaque année à Bakel sont données en millions de m³ par le tableau suivant :

Mois	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	Total
irrigation de 100 000 ha	308	400	380	198	112	174	218	242	274	222	190	144	2 862
crue artificielle SOGREAH	-	-	-	4860	5600	1800	-	-	-	-	-	-	12 260
crue artificielle Grpt Manantali	-	-	-	4000	4400	1500	-	-	-	-	-	-	9 900
Besoins en eau à Bakel	308	400	380	4860 ou 4000	5600 ou 4400	1800 ou 1500	218	242	274	222	190	144	14 638 ou 12 278

On prendra pour consignes de gestion du réservoir :

1) partir de la cote 199 au 30 juin (objectif fixé par le Groupe-ment Manantali) et essayer d'y revenir en fin d'année ;

2) assurer pendant la crue la montée régulière du plan d'eau (ni trop lente ni trop rapide) ;

3) à partir de novembre, assurer une décroissance régulière jusqu'à retrouver la cote 199 si possible.

Dans tous les cas les besoins à Bakel pour l'irrigation sont à satisfaire en priorité. En effet on ne peut pas miser sur un développement de l'agriculture si celle-ci manque d'eau plus d'une année sur dix. Pour les deux autres secteurs (agriculture de décrue et énergie), on étudiera, quand il y a impossibilité de les satisfaire simultanément, trois types de gestion qui privilégient soit l'agriculture, soit la régularité de la production énergétique.

3.2 Choix des années

On étudiera trois années d'hydraulicité différente d'après l'échantillon reconstitué à Soukoutali : l'année moyenne, l'année 1940 (proche d'une année décennale sèche pour une loi de Gauss sur ces apports annuels) et l'année 1927 (proche d'une année décennale humide pour la même loi).

On parlera donc d'année "type", les résultats n'ayant valeur que d'ordre de grandeur. La méthode permettant de fixer des fréquences précises sur les hectares inondables ou l'énergie produite nécessiterait des calculs beaucoup plus longs, effectués obligatoirement sur ordinateur : il faudrait simuler, avec un pas de temps plus court (de 10 à 15 jours au lieu du mois), l'ensemble des années hydrologiques reconstituées, et en tirer ensuite des valeurs garanties pour une fréquence donnée.

3.3 Résultats et conclusion

Les tableaux ci-après donnent le détail de chaque calcul, et on peut récapituler les résultats de la manière suivante :

Année type moyenne : - irrigation de 100 000 ha (ou même jusqu'à 149 000 ha) ;

- culture en décrue de 100 000 ha, mais légèrement retardée ;

- production possible de 1056 Gwh (de 62 à 144 Gwh/mois).

Année type décennale humide - irrigation de 100 000 ha (ou même jusqu'à 179 000 ha) :

- culture en décrue de 100 000 ha, mais légèrement retardée ;

- production possible de 1238 Gwh (de 73,5 à 144 Gwh/mois).

Année type décennale sèche: - irrigation de 100 000 ha

Gestion 1
privilégiant l'agriculture de décrue

- culture en décrue de 100 000 ha si on admet une baisse de 2,3 milliards de m³ du plan d'eau pour l'année, à récupérer les années suivantes,
- production possible de 468 Gwh (de 0 à 144 Gwh/mois).

Gestion 2
intermédiaire

- culture de décrue sur une surface moindre (environ 65 000 ha) mais permettant de retrouver en fin d'année le plan d'eau initial ;
- production possible de 473 Gwh (de 0 à 144 Gwh/mois).

Gestion 3
 privilégiant
 la production
 énergétique

- culture de décrue sur environ 20 000 ha
- production de 637 Gwh (de 26 à 144 Gwh/mois).

Il n'y a donc aucun problème en phase transitoire pour des années d'hydraulicité moyenne ou supérieure à la moyenne, sauf que l'on ne maîtrise pas parfaitement le calendrier des cultures de décrue. Par contre en année décennale sèche :

- si on privilégie la culture de décrue, on prend un risque car il faut retrouver l'année suivante une année au moins médiane pour remplir de nouveau normalement le réservoir. D'autre part la productible énergétique est nettement inférieur à celui de la phase finale, et très mal réparti dans le temps (production nulle en novembre).
- si on privilégie le secteur énergétique, les superficies cultivables en décrue chutent considérablement, alors que la production hydroélectrique n'est que faiblement augmentée et régulière.

Année type moyenne

Hypothèses hydrologiques en millions de m³

Mois	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	Total
*Apports naturels à Soukoutali	27	278	1022	3022	3410	2050	855	386	182	100	41	28	11 401
Apports naturels à Bakel	23	268	1506	6034	8750	4229	1441	640	351	205	113	47	23 607
Apports intermédiaires (différence)	-4	-10	484	3012	5340	2179	586	254	169	105	72	19	12 206

Gestion optimale du réservoir

Mois	volume lâché ou turbiné (1) hm ³	volume stockable (2) hm ³	Evaporation moins pluie (3) hm ³	volume stocké en fin de mois (4) hm ³	cote du plan d'eau en fin de mois (5) hm	Apport régulé à Bakel (6) hm ³	chute nette moyenne (7) m	énergie produite (8) Gwh
				7 300	199			
J	792	230	-			1268	43,7	60
A	2172	350	-	7530	199,5	5134	45,3	144
S	1810	600	-	8704	202	7150	48,3	144
O	1050	1000	-	9980	205	3229	51,2	124,5
N	630	225	70	11135	208	1216	52,7	77
D	630	- 244	70	10821	207	884	52,5	76,5
J	630	- 448	70	10303	206	799	51,5	75
F	630	- 530	70	9703	204,5	735	49,5	72
M	630	- 589	70	9044	203	702	47,5	69,5
A	630	- 602	70	8372	201,5	649	46	67
M	630	- 603	70	7699	200	626	44,7	65
J	607	- 329	70	7300	199	597	44	62

NB. : (1)+(2) = apport naturel à Soukoutali

(4) mois n = (4) n-1 + (2) - (3)

(6) = (1) + apport intermédiaire - besoins à Bakel

(8) = (1) x (7) x 2,725 10⁻³ x 85 % Gwh, plafonné à 144 Gwh maxi (200 Mw pendant 1 mois)

Bilan

irrigation de 100 000 ha (jusqu'à 149 000 ha possible)	crue artificielle de $Q_{30} = 2750 \text{ m}^3/\text{s}$ autour du 15 septembre	1056 Gwh produits
---	---	-------------------

Année type décennale humide

Hypothèses hydrologiques- en millions de m³

Mois	M	J ₁	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	Total
Apports naturels à Soukotali	23	280	1115	3655	4238	2921	1340	581	246	161	75	29	14 664
Apports naturels à Bakel	26	311	2014	7258	12299	7110	2276	985	531	311	181	83	33 385
Apports intermédiaires	3	31	899	3603	8061	4189	936	404	285	150	106	54	18 721

Gestion optimale du réservoir

Mois	Volume lâché ou turbiné (1) hm ³	Volume stockable (2) hm ³	Evaporation moins pluie (3) hm ³	Volume stocké en fin de mois (4) hm ³	côte du plan d'eau en fin de mois (5) m	Apport régulé à Bakel (6) hm ³	Chutte nette moyenne (7) m	énergie produite (8) Gwh
J	900	215	-	7300	199	1799	43.7	91
A	2400	1255	-	7515	199,5	6003	45.7	144
S	1608	2630	-	8770	202,5	9669	50.1	144
O	2921	-	-	11400	208	7110	53	144
N	1270	-	70	11400	208	2206	53	144
D	720	- 139	70	11400	208	1124	53	88,5
J	720	- 474	70	11191	208	1005	52.5	87,5
F	720	- 559	70	10647	207	870	51.1	85
M	720	- 645	70	10018	205,5	826	49.3	82
A	720	- 691	70	9303	204	774	47.5	79
M	720	- 697	70	8542	202	723	65.6	76
J	685	- 405	70	7775	200	716	44	73,5
				7300	199			

N.B. : légende identique à celle du tableau précédent.

Bilan :

irrigation de 100 000 ha (jusqu'à 179 000 ha possible)	crue artificielle de $Q_{30} = 3730 \text{ m}^3/\text{s}$ centrée autour du 15 septembre Sdécrué $\leq 150\ 000 \text{ ha}$	1238 Gwh produits
--	--	-------------------

Année type décennale sèche

Hypothèses hydrologiques en millions de m³

Mois	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	Total
Apports naturels à Soukoutali	23	280	508	1884	2100	1692	713	351	155	88	36	10	7 847
Apports naturels à Bakel	26	130	544	3411	3481	3250	1371	518	311	176	98	39	13 355
Apports intermédiaires (différence)	3	150	36	1527	1381	1558	658	160	156	88	62	29	5 508

Gestion 1 du réservoir : priorité à la crue SOGREAH $Q_{30} = 2500 \text{ m}^3/\text{s}$

Mois	Volume lâché ou turbiné(1) hm ³	Volume stockable (2) hm ³	Évaporation moins pluie (3) hm ³	Volume stocké en fin de mois(4) hm ³	Côte du plan d'eau en fin de mois (5) m	Apport régulé à Bakel (6) hm ³	Chutte nette moyenne (7) m	Énergie produite (8) Gwh
J	344	164	-	7 300	199	380	43.5	34.5
A	3 333	- 1 449	-	7 464	199	4 860	41.4	144
S	4 219	- 2 119	-	6 015	195	5 600	36.1	144
O	242	1 450	-	3 896	188	1 800	35.2	19.5
N	-	713	70	5 346	193,5	658	38.2	-
D	82	269	70	5 989	195	242	39.8	7.5
J	118	37	70	6 188	196	274	40.3	11
F	134	- 46	70	6 155	196	222	39.8	12.5
M	128	- 92	70	6 039	195	190	39.3	11.5
A	115	- 105	70	5 877	195	144	38.6	10.5
M	305	- 282	70	5 702	194	308	37.8	26.5
J	550	- 270	70	5 350	193,5	400	36.7	47
				5 010	192			

NB. Légende identique à celle des tableaux précédents.

Bilan

irrigation de 100 000 ha au maximum	crue artificielle de $Q_{30} = 2500 \text{ m}^3/\text{s}$ centrée autour du 31 août Sdécruée $\approx 100 000 \text{ ha}$	468 Gwh produits
-------------------------------------	--	------------------

Mais baisse de 7m du réservoir dans l'année (2,3 milliards de m³)

Gestion 2 du réservoir : priorité à l'irrigation et à la crue Groupement Manantali
 $Q_{30} = 1800 \text{ m}^3/\text{s}$

Mois	Volume lâché ou turbiné(1) hm^3	Volume stockable (2) hm^3	Evaporation moins pluie(3) hm^3	Volume stocké en fin de mois(4) hm^3	Côte du plan d'eau en fin de mois (5) m	Apport régulé à Bakel(6) hm^3	Chutte nette moyenne (7) m	énergie produite (8) Gwh
				7 300	199			
J	344	164	-	7 464	199	380	43.5	34.5
A	2 473	- 589	-	6 875	198	4 000	43	144
S	3 019	- 919	-	5 956	195	4 400	40.9	144
O	-	1 692	-	7 648	200	1 558	41.9	-
N	17	701	70	8 279	201,5	670	45.3	1,5
D	82	269	70	8 478	202	242	46.5	9
J	118	37	70	8 445	202	274	46.7	13
F	134	- 46	70	8 329	201.5	222	46.5	14,5
M	128	- 92	70	8 167	201	190	46	13,5
A	115	- 105	70	7 992	200,5	144	45.3	12
M	305	- 282	70	7 640	200	308	44.7	31,5
J	550	- 270	70	7 300	199	400	44	56

NB. Légende identique à celle des tableaux précédents

Bilan

irrigation de 100 000 ha au maximum	crue artificielle de $Q_{30} = 1800 \text{ m}^3/\text{s}$ centrée autour du 31 août S décrue $\approx 65 000$ ha	473 Gwh produits
-------------------------------------	---	------------------

Gestion 3 du réservoir : priorité à l'irrigation mais pas de crue plus forte que la crue naturelle

Mois	Volume lâché ou turbiné(1) hm ³	Volume stockable (2) hm ³	Évaporation moins pluie (3) hm ³	Volume stocké en fin de mois(4) hm ³	Côte du plan d'eau en fin de mois(5) m	Apport régulé à Bakel(6) hm ³	Chute nette moyenne(7) m	Énergie produite (8) Gwh
J	344	164	-	7 300 7 464	199 199	380	43.5	34,5
A	1 884	-	-	7 464	199	3 411	43.5	144
S	2 100	-	-	7 464	199	3 481	43.5	144
O	400	1 292	-	8 756	202,5	1 958	45.2	42
N	300	413	70	9 099	203,5	958	47.4	33
D	300	51	70	9 080	203,5	460	47.9	33,5
J	300	- 145	70	8 865	202,5	456	47.4	33
F	290	- 202	70	8 593	202	378	46.7	31.5
M	250	- 214	70	8 309	201,5	312	46.2	27
A	250	- 240	70	7 999	200,5	279	45.3	26
M	312	- 289	70	7 640	200	315	44.7	32,5
J	550	- 270	70	7 300	199	400	44	56

NB. Légende identique à celle des tableaux précédents.

Bilan

irrigation de 100 000 ha au maximum	crue artificielle de $Q_{30} \approx 810 \text{ m}^3/\text{s}$ centrée autour du 31 août Sdécrué $\approx 20\,000 \text{ ha}$	637 Gwh produits
-------------------------------------	--	------------------

ANNEXE 4 : VOLUME NECESSAIRE AU REMPLISSAGE DES CUVETTES

Le tableau suivant donne par unité naturelle d'équipement le volume nécessaire à son remplissage, en se fondant sur les hypothèses suivantes :

- Les niveaux maximaux atteints sont ceux calculés par le GERSAR au moyen du modèle mathématique (référence 3) pour la crue artificielle, et ceux figurant dans l'atlas des unités naturelles d'équipement pour la crue de 1970 ;

- les courbes hauteur/volume sont celles que fournit "l'atlas des unités naturelles d'équipement" J. Chaumeny juin 73 ;

- l'évaporation pendant la crue est négligée car elle est à cette époque du même ordre de grandeur que la pluviométrie. Par contre un volume de 1000 m³/ha pour l'imbibition des sols est ajouté au strict volume de remplissage.

Il faut bien noter que ces volumes ne sont pas atteints au même moment dans les différentes cuvettes, puisque l'onde de crue met environ 30 jours pour se déplacer de Bakel au delta. L'eau du fleuve sert donc à compenser l'évaporation sur les cuvettes en amont en même temps qu'elle sert à remplir les cuvettes en aval.

VOLUME NECESSAIRE AU REMPLISSAGE DES
UNITES NATURELLES D'EQUIPEMENT

en millions de m³.

UNE rive droite			UNE rive gauche		
	crue artificielle	crue de 1970		crue artif.	crue de 1970
GA 1			GU	-	32
			DA	-	38
GA 1	23	23	NG 1	-	36
GA 2	55	61	NG 2	43	61
KO 1	58	60	NG 3	56	73
KO 2	47	50	NG 4	-	117
KO 3	50	52	MO 1	46	39
KO 4	28	30	MO 2	58	87
KO 5	24	222	MO 3	57	210
KO 6	9	158	MO 4	22	41
KO 7	-	21	MO 5	79	59
KO 8	28	95	MO 6	34	34
BO 1	60	74	MO 7	86	66
BO 2	8	21	MO 8	15	9
BO 3	8	8	MO 9	135	137
MB 1	36	37	MO 10	26	45
MB 2	67	69	MO 11	118	142
MB 3	42	100	MO 12	35	51
KI	220	226	MO 13	5	40
GA	20	28	MO 14	6	23
DAO	30	50	MO 15	2	35
MD 1	37	57	MO 16	19	18
MD 2	75	88	MO 17	24	20
MD 3	9	31	MO 18	14	11
MD 4	34	18	DO 1	142	70
MD 5	27	15	DO 2	23	13
			DO 3	18	12
total	995	1594	OT 1	259	125
			OT 2	281	194
			OT 3	7	7
			OT 4	83	74
			OT 5	79	52
			OT 6	59	56
			Di 1	26	16
			Di 2	5	4
			Di 3	3	-
			Di 4	7	16
			Di 5	27	39
			Di 6	31	43
			MK 1	46	35
			MK 2	157	235
			MK 3	18	31
			TB 1	68	150
			TB 2	21	51
			TB 3	7	22
			DE 1	42	28
			DE 2	14	27
			DE 3	3	37
			total	2306	2761

volume total rive droite et gauche

crue artificielle 3301 hm³
 crue de 1970 4355 hm³
 crue de 1968 2429 hm³ (référence 1)

volume écoulé à Bakel pendant trois mois

crue artificielle 9900 hm³
 crue de 1970 15680 hm³
 crue de 1968 10700 hm³.